JANUARY 2005 · € 6,90 (D/A)
DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

- > Fehlerhafte Raketenabwehr
- > DNA als Nanomaschine
- > Fatale Klimaaufheizung
- > Ursprung des Verstandes
- > ESSAY: Wie man alle Menschen glücklich macht

www.spektrum.de

KOSMOPHYSIK

Ist das Weltall ein Computer?

Alle Objekte im Kosmos gleichen Rechenmaschinen – selbst Schwarze Löcher

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €
4 194058 406900 01



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Undicht am Himmel

Sein Land gegen Angriffe zu verteidigen ist ehrenvoll. Es mit Mitteln zu tun, die dieser Aufgabe nicht gewachsen sind, ist nur teuer und töricht. Seit die Sowjetunion sich als Erzfeind vom Dienst verabschiedet hat, bleiben als Bedrohungsstaaten mit atomarem Potenzial derzeit nur noch Nordkorea und der Iran. Beide haben sich in der Vergangenheit durch nukleare Aufrüstung unbeliebt gemacht, im Fall des Irans scheint sich zumindest temporär eine Entspannung abzuzeichnen.

Das sagt noch nicht viel über eine transkontinentale Bedrohung durch Langstreckenraketen, die gegen die USA gerichtet sein könnten – eine potenzielle Bedrohung mit nuklearen oder biologischen Waffen, gegen die sich Bushs *National Missile Defense* (Nationale Raketenabwehr, NMD) richtet. Richard L. Garwin wendet sich in seinem Beitrag nicht unbedingt gegen eine »wirksame Abwehr«. Jedoch bezweifelt der langjährige Berater der US-Regierung in Sachen Waffentechnologie und Raketenabwehr, dass die Milliarden für die gegenwärtige Strategie richtig angelegt sind (S. 66).

Zwar ist die NMD keine direkte Wiederauflage von Reagans *Strategic Defence Initiative* SDI. Doch drängt sich der Eindruck auf, dass dieser »Son of Star Wars« wesentliche Mängel des SDI-Programms keineswegs vermeidet und das Ganze doch wieder nur ein gigantisches Wirtschaftsförderprogramm darstellt. Kritik kommt nicht nur von Garwin, sondern auch von Forschern des Massachusetts Institute of Technology (MIT). Dessen Sicherheitsexperte Theodore Postol etwa hebt als größte Schwäche der NMD die Unfähigkeit der NMD-Sensoren hervor, zwischen Nuklearsprengköpfen und selbst simpelsten Attrappen zu unterscheiden.

NUKEPHOTO.COM / PAUL SHAMBROOM

Postol hatte sich bereits 1992 mit dem Pentagon angelegt, als er die US-Raketenabwehr im Golfkrieg von 1991 untersuchte. Er widersprach der Behauptung der Militärs, Patriot-Raketen hätten 96 Prozent von Saddam Husseins Scud-Raketen erfolgreich abgefangen. Stattdessen bewies er, dass die tatsächliche Abfangrate praktisch gleich null war. Kürzlich legte Postol im »New Scientist« nach, in dem er auch dem Patriot-Einsatz des zweiten Golfkriegs vom Frühjahr 2003 allerschlechteste Zensuren ausstellte. Dort waren nämlich zwei nach Kuweit heimkehrende Bomber von Patriot-Raketen abgeschossen worden – *friendly fire*.

»Obwohl die NMD-Technologie anders ist als die der Patriot«, urteilt der MIT-Experte, »teilen sie die gleiche problematische Ideologie – nämlich den Glauben, dass man anfliegende Raketen zuverlässig zerstören könne.« Kein Wunder, dass nicht nur Postol fragt, wie man die USA gegen einen Raketenangriff verteidigen will, wenn alle verfügbaren Abwehrsysteme »zutiefst fehlerhaft« sind. Womöglich geht es in erster Linie auch gar nicht darum. Spektrum der Wissenschaft zitierte dazu schon vor Jahren einen US-Diplomaten (SdW 9/2001, S. 86) mit einer Aussage, die noch immer gültig scheint: »Die Bedrohung durch Schurkenstaaten ist real. Wir müssen unseren Bürgern zeigen, dass wir etwas dagegen tun. Eine Raketenabwehr ist die einzige Möglichkeit, die wir haben – ob sie funktioniert oder nicht.«

PS: Richten wir den Blick auf 2005: 1. Was **wird** die Forschung im kommenden Jahr besonders beschäftigen? 2. Womit **sollte** sich die Forschung Ihrer Meinung nach auseinander setzen? Machen Sie mit und schreiben Sie uns Ihre Meinung unter www.spektrum.de/2005.

JANUAR 2005

INHALT

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Ein Schwarzes Loch, symbolisch garniert mit Transistoren und Chips: Aus Sicht der Informationstheorie sind diese Objekte – wie sogar der gesamte Kosmos – rechnende Systeme.
Grafik: Kay Chernush

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

SEITE 44

SEUCHEN

Mythos Pest

Steckte hinter dem »großen Sterben« einzig und allein der schwarze Tod? Die Ereignisse vor allem im 14. Jahrhundert deuten auch auf andere Ursachen hin

SEITE 50

TREIBHAUSEFFEKT

Lässt sich die Klima-Zeitbombe noch entschärfen?

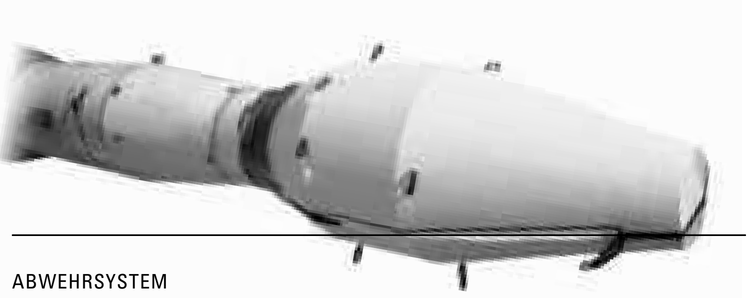
Die Erde darf sich nur um ein weiteres Grad erwärmen, bevor die polaren Eisdecken zerfallen und eine weltweite Überflutung küstennaher Tiefländer droht. Aber jüngste positive Trends wecken Hoffnung, dass es nicht dazu kommt

SEITE 60

KRIMINOLOGIE

Verlässlichkeit von Zeugen

Neue, psychologisch fundierte Methoden helfen den polizeilichen Ermittlern, die Glaubwürdigkeit von Tatzeugen einzuschätzen und die Genauigkeit ihrer Aussagen zu erhöhen



SEITE 66

ABWEHRSYSTEM

Löcher im Raketenschild

Mit einem aufwändigen Verteidigungssystem wollen die USA ihre Bürger beruhigen, doch einen effizienten Schutz kann die komplexe Technik nicht bieten

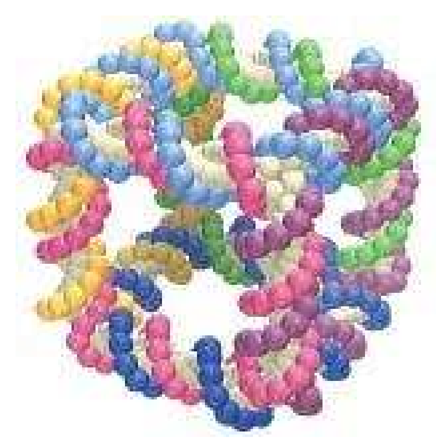
SEITE 24

EVOLUTION

Der Ursprung unseres Verstandes

Die überragende motorische Intelligenz des Menschen gab den Anstoß für seine kulturelle Evolution – auch für die Sprache





JANUAR 2005

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Graffiti in Pompeji

Ob Latrinenspruch, Schreibübung oder Propaganda – Pompejis Wände boten dem Schriftkundigen viel Platz

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Flugsaurier – warmblütige Pioniere der Lüfte

November 2004

Die größten Vögel, die Strauße, bringen stattliche 150 Kilogramm auf die Waage. Flugfähige Vögel mit einer Masse von über 10 Kilogramm sucht man hingegen vergeblich. Beim Anblick eines startenden Schwans ist es mit Händen zu greifen, dass ein aktives Fliegen mit ein paar Kilo Zusatzgewicht nicht mehr möglich wäre. Ein flugfähiger Saurier mit einer Masse von 100 Kilogramm stellt deshalb eigentlich eine biophysikalische Sensation dar. Wie brachten Saurier ein Gewicht in die Luft, das zehnmal größer ist als das der größten flugfähigen Vögel?

Leider geht Eric Buffetaut in seinem Artikel kaum auf diese Frage ein. Vielmehr behauptet er ohne nähere Begründung, dass diese Saurier nicht nur Segler, sondern gewandte Flieger gewesen seien. Wenn er dann daraus folgert, dass nur Warmblüter die dafür notwendige Energie aufbringen konnten und dass die Blutgefäße der Flügel der Abgabe von überschüssiger Wärme an die Umgebung dienten, dann baut er eine unsichere Beweiskette auf.

Genauso gut könnte man argumentieren, dass Flugsaurier wechselwarm waren, mit ihren Flügeln Sonnenwärme aufnehmen konnten und wegen eines zu wenig leistungsfähigen Stoffwechsels nur segeln, aber nicht gewandt und kraftvoll fliegen konnten. So macht der ganze Artikel einen etwas Jurassic-Park-mäßigen Eindruck, mit vielen schönen Bildern und detaillierten, unbelegten Angaben. Die Zweifel, ob die Saurier wirklich so viel leistungsfähigere Flieger waren als die heutigen Vögel, bleiben.

Daniel Heierli, Zürich



▼ Fährten lassen annehmen, dass die Flugsaurier beim Gehen die Hände wie abgebildet mitaufsetzten.

PIERRE ROLLER UND JEAN-MICHEL MAZIN

Erratum

Die ersten Flugsaurier erschienen vor 220 Millionen Jahren. Der Fehlerteufel hat sie durch Anhängen weiterer drei Nullen früher als das erste Leben auftreten lassen.

Die Redaktion

Dunkle Energie bremst Computer aus

Forschung aktuell, Oktober 2004

In diesem Artikel ist mir eine Unstimmigkeit aufgefallen, die ich mir selbst nicht erklären kann.

Für die Betrachtungen des Autors sind nur die grundlegenden physikalischen Gesetze relevant. Folglich können Energie und die damit verbundenen Informationen nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegt werden. Insofern stimme ich auch mit Herrn Maier überein.

Unklar ist mir hingegen, warum es den Galaxien gestattet ist, sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit fortzubewegen, denn auch sie müssten ja den gleichen physikalischen Gesetzen unterworfen sein, die so etwas, meines Wissens nach, nicht zulassen. Denn es sind dieselben Gesetze, die die Geschwindigkeit der Energie mit der Lichtgeschwindigkeit als Maximalgeschwindigkeit begrenzen.

David Schinkel, Nuthe-Urstromtal

Antwort des Autors Stefan A. Maier

Einer einfachen Rechnung zufolge sollten sich alle Galaxien ab einer Entfernung von etwa 4,2 Gigaparsec schneller als mit Lichtgeschwindigkeit c von uns wegbewegen. Dies verletzt die Spezielle Relativitätstheorie nicht. Sie gilt nämlich nur lokal, also für Objekte, die nicht zu weit voneinander entfernt sind. Für derart große Distanzen muss man die Allgemeine Relativitätstheorie heranziehen. Danach dehnt sich die Raumzeit zwischen uns und der fernen Galaxie mit einer höheren Geschwindigkeit als c aus, und das ist erlaubt.

Lernen im Schlaf – kein Traum

November 2004

Eine kathartische Funktion des Traumes, wie im Beitrag unterstellt, hat Freud nicht behauptet. Eine solche Theorie ist in Ignoranz der psychologischen Erkenntnis in neuerer Zeit meines Wissens nur von Seiten der Neurologie eingebracht worden. Danach feuern die Neuronen wegen ihrer übermäßigen Erregung während des Wachlebens im Schlaf chaotisch, um sich auf diese Weise zu entladen oder, psychologisch ausgedrückt, »abzuagieren«.

Freud hat es als essenzielle Aufgabe des Traumes angesehen, die Unterbrechung des Schlafes abzuwenden. Er nennt ihn »Hüter des Schlafes«. Sinnesreize, die akustisch eindringen, werden wie Assoziationen des »Primärsystems« behandelt und rufen nicht das »Sekundärsystem« wach, wecken also den Schläfer nicht. Innere Reize, die als Wunschziele auftreten, erhalten eine halluzinatorische Befriedigung. In diesem Sinne postuliert er eine Wunscherfüllungsfunktion des Traumes, die für Freud jedoch keineswegs realistisch genug ist, um einen heilsamen kathartischen Effekt zu bewirken.

Prof. Gerhard O. Krebs, Quickborn

Der ungewöhnliche Tod gewöhnlicher Sterne

September 2004

Das Ende des Raumschiffs Erde

Oktober 2004

Zwei sehr interessante Artikel, die mich aber auch nachdenklich stimmen.

Es bleibt die Frage: Wie stellt sich das Verschwinden des Lebens – und ganz besonders der Menschheit – aus politischer und soziologischer, aber auch aus theologischer Sicht dar?

Wie vertragen sich zunehmende Bevölkerungen mit verengenden Lebensräumen und abnehmenden Ressourcen, insbesondere reduziertem Wasser- und Nahrungsangebot? Wird die Bevölkerung von allein schrumpfen? Findet eine negative Evolution statt?

Und wie sehen Theologen das unaufhaltsame Vergehen allen Lebens?

Wolfgang Schäfer, Bottrop

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Viele Arbeiten fanden in der 9000 Jahre alten Siedlung Çatal Hüyük auf den Dächern statt.

Çatal Hüyük – Stadt der Frauen?

September 2004

Dem Artikel entnehme ich ein Missverständnis des Begriffs »Matriarchat«. Um dies zu vermeiden, spreche ich lieber von »matrizentrischen Kulturen«, die sich im Gegensatz zu patriarchalen Gesellschaften gerade nicht durch hierarchische Herrschaftsverhältnisse auszeichnen. Die Dominanz, die sich unter anderem in Essensprivilegien ausdrückt, ist typisch patriarchal; und wenn sie, wie auch eine strikte Arbeitsteilung, in Çatal Hüyük nicht auffindbar sind, so spricht dies für eine ausbalancierte, vorpatriarchale Gesellschaft. Matrizentrisch ist aber meines Erachtens die Mythologie, die aus den sakralen Kunstwerken Çatal Hüyüks spricht.

Schon ab dem Jungpaläolithikum wird das Mütterlich-Göttliche als der Ursprung allen Lebens in weiblich-menschlicher Gestalt dargestellt, während die männliche Zeugungskraft zunächst in Tiergestalt erscheint.

Noch heute sind bei indigenen Schöpfungsmythen oft eine Urahnin und ein mächtiges Tier die Ureltern des Stammes. Dass es in den Frühkulturen Schamanen beziehungsweise Priester neben Schamaninnen und Priesterinnen gibt, bestätigt nur, dass eine starke Stellung der Frauen keine Diskriminierung der Männer bedeutet, wie dies umgekehrt der Fall ist.

Dr. Carola Meier-Seethaler, Bern

Der geschmiedete Himmel

November 2004

Seit mehr als zweitausend Jahren wird ein Phänomen diskutiert, das uns den Mond hoch am Himmel wesentlich kleiner erscheinen lässt als in Horizontnähe. Es handelt sich bei diesem so genannten Mondphänomen um keinen physikalisch messbaren Effekt, also um keine optische, sondern um eine reine Wahrnehmungstäuschung.

Wenn nun die Himmelsscheibe von Nebra authentisch und die in Ihrem Beitrag vorgestellte Interpretation schlüssig ist, nämlich dass darauf zwei Monddarstellungen zu sehen sind, einmal als Vollmond hoch am Himmel und dann als Sichel tiefer in Richtung des Westhorizonts, dann fällt der deutliche Größenunterschied der Monddurchmesser ins Auge.

Falls auf der Scheibe die von den Menschen vor 3600 Jahren wahrgenommene Größe wiedergegeben ist (hoch am Himmel klein, in Richtung Horizont größer), hätte man damit die erste erhaltene Darstellung des Mondphänomens in der Menschheitsgeschichte.

Prof. W. A. Kreiner, Ulm

Erratum

Kollektive Intelligenz der Kleinstcomputer

Oktober 2004

Die Wellenläufer *(Leach's storm petrel)* heißen mit wissenschaftlichem Namen *Oceanodroma leucorhoa* (nicht *leucorhoea*) und gehören nicht zur Familie der Seeschwalben, sondern der Sturmschwalben (Hydrobatidae).

Friedrich Seibert aus Rostock hat uns auf den Fehler aufmerksam gemacht und fügt hinzu, dass weder See- noch Sturmschwalben echte Schwalben sind. Der deutsche Volksmund hat zahlreiche Vogelarten, die den Singvogel-Schwalben ähnlich sehen, ihnen aber nur entfernt verwandt sind, wegen äußerer Ähnlichkeiten (gegabelter Schwanz, schmale, schnittige Flügel) als »-schwalben« bezeichnet.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Olaf Fritsche, Dr. Werner Gans, Dr. Gabriele Herbst, Marianne Kolter, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Jürgen Scheffran, Claus-Peter Sesin.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

KLIMA

Das große Tauen im hohen Norden

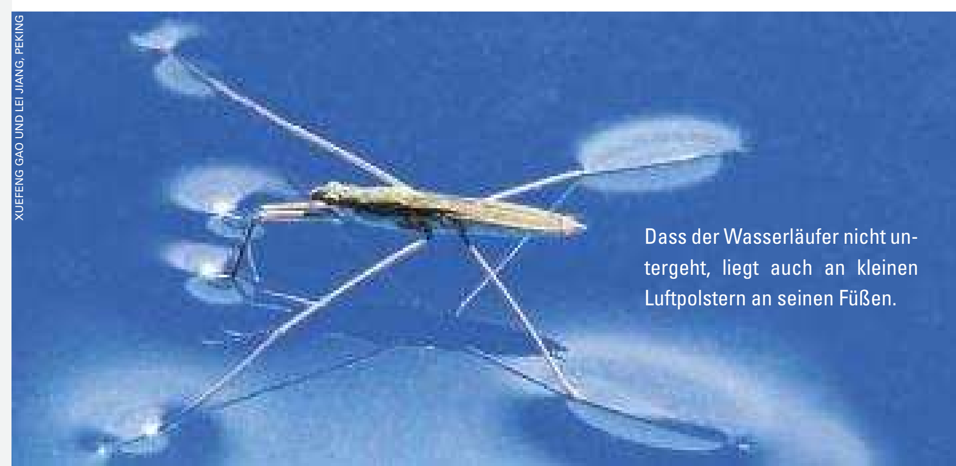
■ Die Modelle der Klimaforscher haben es schon lange vorhergesagt: Die globale Erwärmung sollte sich am stärksten in der Polarregion auswirken. Eine vierjährige Untersuchung von mehr als 300 Wissenschaftlern hat dies jetzt bestätigt. Danach erwärmt sich die Arktis derzeit etwa doppelt so schnell wie der Durchschnitt der Erdoberfläche. Die Folgen sind dramatisch. Während die arktischen Temperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts um weitere vier bis sieben Grad Celsius steigen, ziehen sich Eis und Schnee bei zunehmendem Niederschlag immer weiter zurück. Die sommerliche Meereisfläche dürfte sich mindestens halbieren. Durch die Erwärmung verlagern sich die Vegetationszonen, und die Baumgrenze wandert nach Norden. Manche Tierart stirbt womöglich aus; denn die Lebensräume von Eisbären, Robben und einigen Seevögeln schrumpfen. Auch die Menschen bekommen die Folgen der Erwärmung zu spüren. Schon heute taut der Permafrost auf. Straßen, Häuser und sogar Flughäfen drohen dadurch abzusacken. Andererseits dürfte die Nordwestpassage schiffbar werden und dem Handelsverkehr einen zusätzlichen Seeweg zwischen Europa und Asien eröffnen. Der Abschlussbericht der Untersuchung ist vom Arctic Council, dem acht Anrainerstaaten des Nordpolarmeers angehören, zusammen mit dem International Arctic Science Committee veröffentlicht worden. Auch wenn einzelne Ergebnisse schon länger bekannt sind, liefert er erstmals einen umfassenden Überblick zum Klimawandel in der Arktis. *(Arctic Council, 9.11.2004)*

BIOPHYSIK

Luftikus auf dem Wasser

■ Wasserläufer wuseln – teils in rasantem Tempo – über Tümpel und Pfützen, ohne einzusinken. Für dieses Kunststück nutzen sie die so genannte Oberflächenspannung, die zu verhindern sucht, dass die »Haut« des Wassers zerreißt. Deshalb durchstoßen die langen Beine des Insekts die Wasseroberfläche nicht, sondern erzeugen – wie Rosinen auf einem Pudding – lediglich bis zu vier Millimeter tiefe Dellen.

Allerdings funktioniert der Trick nur, wenn die Füße der Tiere nicht vom Wasser benetzt werden. Dazu sind sie mit vielen feinen Härchen bedeckt und mit einer imprägnierenden Wachsschicht überzogen. Jetzt stellten chinesische Forscher jedoch fest, dass dies für die typischen Spurts, bei denen der Körper mit einem Mehrfachen seines Gewichts auf die Wasseroberfläche drückt, offenbar nicht ausreicht. Wie Xuefeng Gao und Lei Jiang bei elektronenmikroskopischen Untersuchungen entdeckten, hat jedes Fußhaar winzige Rillen. Darin bilden sich Luftpolster, die den direkten Kontakt zwischen Wasser und Haaren verhindern. Erst dieser zusätzliche Effekt lässt die Insekten traumwandlerisch sicher übers Wasser huschen. *(Nature, 4.11.2004, S. 36)*


XUEFENG GAO UND LEI JIANG, PEKING

Dass der Wasserläufer nicht untergeht, liegt auch an kleinen Luftpolstern an seinen Füßen.

WAHRNEHMUNG

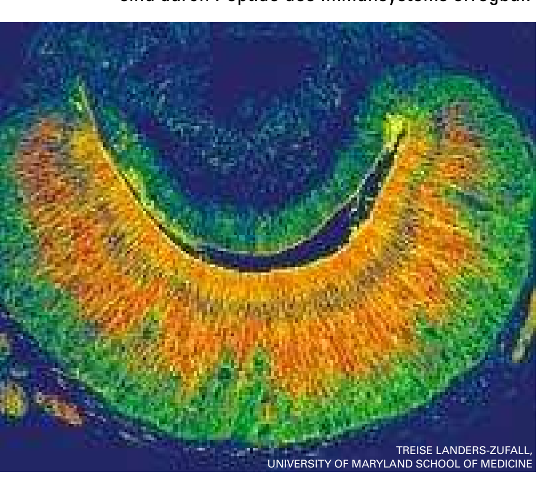
Wie Hunde einander erschnüffeln

■ Es ist eine alte Frage, die nicht nur Herrchen und Frauchen interessiert: Warum schnüffeln Hunde am Hinterteil ihrer Artgenossen? Schon länger weiß man, dass die Vierbeiner – wie die meisten Säugetiere – vorne in der Nasenhöhle über ein so genanntes vomeronasales Organ verfügen, mit dem sie die Identität, das Geschlecht und den sozialen Status ihres Gegenübers bestimmen können. Was sie da genau wittern, war jedoch unklar.

Im Urin von Mäusen sind amerikanische, britische und deutsche Forscher den verräterischen Signalstoffen nun teilweise auf die Spur gekommen. Sie konnten darin kurze Eiweißstücke nachweisen, die zum Immunsystem gehören – genauer: zum Haupthistokompatibilitätskomplex, der über die Gewebeverträglichkeit bei Transplantationen entscheidet. Ihre genaue Zusammen-

▼ Das Meereis in der Arktis schmilzt – bis 2100 könnte die Hälfte verschwunden sein.

▼ Einige Neuronen im Vomeronasalorgan der Maus – auf diesem Gewebeschnitt grün gefärbt – sind durch Peptide des Immunsystems erregbar.



TREISE LANDERS-ZUFALL, UNIVERSITY OF MARYLAND SCHOOL OF MEDICINE

setzung ist bei jedem Individuum anders; dadurch kann die Körperabwehr fremd und eigen auseinander halten. Hunde und Mäuse nehmen diese Stoffe im Urin – oder eben am Hinterteil – mit dem Vomeronasalorgan als individuelle »Duftnote« wahr, an der sie ihren Träger erkennen – ähnlich wie wir andere Menschen zum Beispiel anhand ihrer Stimme identifizieren können. *(Science, 5.11.2004, S. 1033)*

ASTRONOMIE

Cassini entschleiert Titan

Vor mehr als 300 Jahren entdeckte er vier Saturnmonde und eine Lücke in den Saturnringen: Giovanni Domenico Cassini. Zu Recht stand er daher Pate für die Sonde, welche Nasa und Esa vor sieben Jahren gemeinsam zu dem Gasplaneten auf die Reise schickten. Inzwischen ist der Kundschafter am Ziel angekommen und hat schon etliche faszinierende Aufnahmen von Saturn, seinen Ringen und dem Mond Titan zur Erde gefunkt.

Vor allem der Trabant weckt die Neugier der Astronomen, weil seine Atmosphäre der irdischen ähnelt, seine Oberfläche aber unter einem dichten Dunstschleier verborgen liegt. Den konnte die Sonde mit ihren Ultraviolett- und Infrarotsensoren nun teilweise durchdringen. Vor allem im nahen Infrarotbereich zeigt die Oberfläche starke Helligkeitskontraste, deren Ursache aber noch unklar ist. Eine besonders helle Region hat die Größe eines irdischen Kontinents und wurde nach einer legendären Stadt in China Xanadu getauft.

In dem unten gezeigten Falschfarbenbild, zusammengesetzt aus mehreren Aufnahmen von Cassini beim ersten nahen Vorbeiflug an Titan am 26. Oktober, stehen rot und grün für Wellenlängen im Infraroten. Der von der UV-Kamera fotografierte Dunst zeigt als blauer Ring die hunderte Kilometer dicke Atmosphäre von Titan. Am unteren Bildrand sind ein paar helle Wolken zu sehen. Mit Spannung erwarten die Forscher nun die Daten der von Cassini mitgeführten Sonde Huygens, die Mitte Januar auf Titan niedergehen soll. *(Esa, 27.10.2004)*

▼ Die jüngste Falschfarbenaufnahme von Titan zeigt starke Helligkeitskontraste auf der Oberfläche des Saturnmonds und die dicke Atmosphäre als blauen Ring.



NASA / JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE



FRANÇOIS GAUTHIER-LAFAYE

In den Uranminen von Oklo waren vor zwei Milliarden Jahren natürliche Kernreaktoren in Betrieb.

KERNPHYSIK

Naturreaktor ganz ohne GAU

Schon seit 1972 ist bekannt, dass im Gebiet der Oklo-Mine, eines Uranbergwerks in Gabun, vor 2 Milliarden Jahren bis zu 17 natürliche Kernreaktoren 150 Millionen Jahre lang in Betrieb waren. Wieso sie all die Zeit ganz ohne GAU friedlich vor sich hinköchelten, haben jetzt Wissenschaftler von der Washington University in St. Louis (Missouri) herausgefunden. Als das Team um Alexander Meshik die Isotope des Spaltprodukts Xenon im Gestein analysierte, entdeckte es nur solche, die sich erst nach einiger Zeit bilden. Die Reaktoren müssen folglich immer wieder ihren Betrieb unterbrochen haben und abgekühlt sein, wobei das nun verspätet entstehende Xenon im Gestein zurückblieb, während alles noch in der Hitze gebildete verdampft war.

Die entscheidende Rolle beim Regulationsprozess spielte offenbar das Wasser in Klüften und Poren. Es fungierte als Moderator, der die schnellen Neutronen, die bei der Uranspaltung entstehen, so weit abbremste, dass sie ihrerseits andere Atomkerne spalten konnten. Nur dadurch kam eine Kettenreaktion in Gang. Wie Meshiks Team berechnete, hatte sich der Naturreaktor aber nach einer halben Stunde Betriebszeit derart erhitzt, dass alles Wasser verdampfte. Folglich stoppte die Kettenreaktion, und das Gestein kühlte ab. Innerhalb von zweieinhalb Stunden sickerte nun frisches Wasser nach und warf den Reaktor wieder an, sodass ein neuer Zyklus beginnen konnte. *(Physical Review Letters, 29.10.2004, 182302)*



MUSEUM OF LONDON, RICHARD EVERSHED

UNIVERSITY OF BRISTOL

Die 1800 Jahre alte Gesichtscreme – links im Original und rechts nachgemacht – enthielt Zinn.

ARCHÄOLOGIE

Vornehme Blässe dank Zinn

Nicht nur im dekadenten Rom, sondern auch in der fernen britischen Provinz benutzte die Dame von Welt eine Tönungscreme, um ihrem Gesicht die begehrte vornehme Blässe zu verleihen. Das entdeckten nun Chemiker um Richard Evershed von der Universität Bristol, als sie den Inhalt eines fast 1800 Jahre alten Töpfchens untersuchten, das letzten Sommer in den Überresten eines römischen Tempels in der Nähe von London gefunden wurde. Die weißliche Paste enthielt Stoffe, wie sie auch heute noch in Deckcremes vorkommen – insbesondere Schaf- und Rinderfette sowie Stärke aus Wurzeln und Samen. Die Tönwirkung verdankte sie etwa 15 Prozent Zinnoxid.

Weil der Inhalt des Töpfchens ranzig und nicht mehr zu gebrauchen war, mixten die Forscher gemäß den Ergebnissen ihrer Analyse ein frisches Präparat zusammen – und konnten sich im Selbstversuch von seiner Qualität überzeugen. Es hatte genau die richtige Konsistenz und fühlte sich beim Auftragen ausgesprochen angenehm an, zunächst fettig und dann samtig. Auch die Deckwirkung des Zinnoxids war zufriedenstellend.

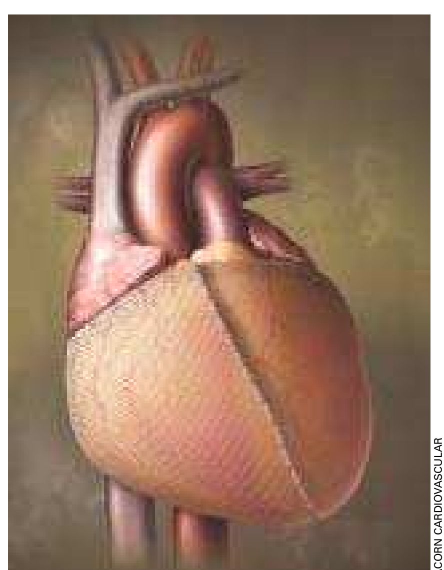
Vor dem Londoner Fund kannten die Archäologen nur Tagescremes mit giftigem Bleiacetat. Es wurde in Britannien vermutlich durch Zinn ersetzt, weil die Zinnminen Cornwalls näher lagen als die Bleiminen Roms. Von Bleivergiftung wussten die Alten Römer ebenso wenig wie sie die beiden chemisch ähnlichen Metalle unterscheiden konnten.
(Nature, 4. November 2004, S. 35)

MEDIZIN

Strumpf fürs Herz

Üblicherweise dienen Stützstrümpfe dazu, aus der Form geratenen Venen Halt zu geben. Vielleicht ließe sich einem krankhaft vergrößerten Herzen ja auf ähnliche Weise helfen, dachten US-Wissenschaftler jetzt. Und so entwickelten sie einen passend zugeschnittenen netzartigen Beutel aus Polyester, der wie ein Korsett über das erschlaffte Organ gezogen, angepasst und vernäht wird.

Dass die mechanische Stütze namens CorCap Cardiac Support Device der ausgeleierten Pumpe gut tut, scheint eine Studie mit 300 Versuchspersonen zu bestätigen, die Douglas Mann im Auftrag der Herstellerfirma Acorn Cardiovascular durchgeführt hat. Wie der Kardiologe auf einer Tagung der American Heart Association in New Orleans kürzlich berichtete, habe sich der klinische Zustand bei etwa 38 Prozent der Strumpfträger nach zwei Jahren deutlich gebessert – im Vergleich zu nur 28 Prozent der herkömmlich behandelten Patienten. In Deutschland wartet ein ähnliches Netz aus elastischem Material, das von Ärzten um Emmeran Gams an der Universität Düsseldorf entwickelt wurde, noch auf die Zulassung für klinische Studien.
(American Heart Association, 2004)



ACORN CARDIOVASCULAR

Das CorCap umschließt das krankhaft vergrößerte Herz und hält es in Form.

EVOLUTION

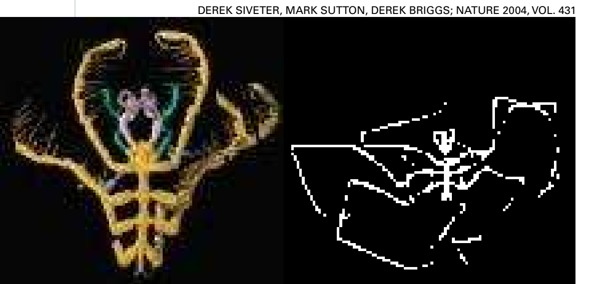
Asselspinne scheibchenweise

Die im Meer lebenden, langbeinigen Pycnogoniden heißen zwar auf Deutsch Asselspinnen, aber ob sie tatsächlich zur Klasse der Spinnentiere gehören – so wie etwa Milben und Skorpione –, war bisher unklar. Anatomische Untersuchungen erlauben keine eindeutige Klassifikation. Forschern aus Großbritannien und den USA ist der Verwandtschaftsnachweis jetzt jedoch gelungen – am Überrest einer längst ausgestorbenen Frühform, der sie den Namen *Haliestes dasos* gaben.

Vor 425 Millionen Jahren bereitete ein Vulkanausbruch einer Asselspinne ein jähes Ende. In ausgeworfener Asche eingeschlossen und konserviert, wurde sie kürzlich in der englischen Grafschaft Herefordshire gefunden. Ihre zarten Glieder waren zwar zerfallen, aber Kalk, der sich in den Hohlräumen abschied, bildete sie getreulich nach. Er ist dem umgebenden Gestein allerdings so ähnlich, dass sich die Spinnenversteinerung mit gewöhnlichen Techniken nicht aus dem Fundstück herauslösen ließ.

Daher entschlossen sich die Forscher zu einer Radikalmethode: Sie schliffen das Gesteinsstück einfach ab – in Abständen von zwanzig bis dreißig Mikrometern. So ging der Fund zwar verloren, aber aus den Digitalfotos der Schnittflächen ließ sich per Computer die dreidimensionale Struktur rekonstruieren. Und siehe da: Die Asselspinne hatte Scheren (Cheliceren) am Kopf – ein charakteristisches Merkmal der Spinnentiere. *(Nature, 21.10.2004, S. 978)*

DEREK SIVETER, MARK SUTTON, DEREK BRIGGS; NATURE 2004, VOL. 431



Die ausgestorbene Asselspinne *Haliestes dasos* (links) ähnelt der rezenten Art *Nymphon gracile* (rechts). Ihre Scheren (violett), die bei *Nymphon* fehlen, weisen sie als Spinnentier aus.

Mitarbeit: Kerstin Beckert und Sven Titz

Im Tod vereint

Das Drama geschah vor 40 bis 50 Millionen Jahren: Eine Milbe hatte sich gerade an einer Langbeinfliege festgebissen, da schloss ein Harztropfen beide ein. Im Tod vereint, wurden der Parasit und sein Opfer so zur Inkluse in einem baltischen Bernstein und damit unsterblich. Der Wissenschaftsfotograf Heinz Günter Beer aus Oberasbach hat diesen seltenen »Schnappschuss« der Natur nun auch im Bild festgehalten. Durch geschickte Ausleuchtung auf einem Mikroskoptisch und fotografische Tricks erreichte er eine große Schärfentiefe, die jedes Detail wie die feinen Härchen an den Beinen der Milbe plastisch hervortreten lässt. Die Aufnahme entstand in Zusammenarbeit mit dem Institut für Paläontologie der Universität Hamburg, aus deren Bernsteinsammlung das rare Stück stammt. Ziel war es, die Inklusen durch fotografische Dokumentation für eine wissenschaftliche Auswertung – wie die genaue systematische Zuordnung der eingeschlossenen Tiere – allgemein zugänglich zu machen. Hier ließ sich die Milbe bis auf die Gattungsebene *(Leptus)* bestimmen.



HEINZ GÜNTER BEER, OBERASBACH

PALÄANTHROPOLOGIE

Der Zwergmensch von Flores

Fast nach jedem Skelettfund eines Frühmenschen heißt es, nun müssten die anthropologischen Lehrbücher umgeschrieben werden. Doch bei dem jetzt entdeckten Hominiden in Indonesien gilt das wirklich.

Von Chris Stringer

Nach gängiger Lehrmeinung verließ der *Homo erectus* als erster Mensch vor etwa zwei Millionen Jahren seine Urheimat Afrika. Dass er schon weit herumkam, beweisen 1,8 Millionen Jahre alte Fossilien einer urtümlichen Form von *H. erectus* in Dmanisi am Südrand des Kaukasus (Spektrum der Wissenschaft 4/2004, S. 24) sowie etwas jüngere Funde in China und auf Java. Auf diese Insel konnten die Hominiden damals noch trockenen Fußes gelangen. Aber dann stoppte das Meer ihren weiteren Vormarsch in Richtung Australien. Bereits die Inselkette östlich von Java blieb für *H. erectus* deshalb unerreichbar – so jedenfalls die bisherige Ansicht.

Doch vor sechs Jahren behauptete eine Gruppe von Archäologen unter Leitung von Mike J. Morwood von der Universität von Neu-England in Armidale (New South Wales, Australien), auf der Insel Flores – 500 Kilometer östlich von Java – 800 000 Jahre alte Steinwerkzeuge gefunden zu haben. Nicht nur ich reagierte skeptisch, auch die meisten meiner Kollegen bezweifelten, dass *H. erectus* den Sprung dorthin geschafft haben könnte. Schließlich hätte er dazu Boote bauen müssen. Das trauten wir erst dem *Homo sapiens* zu.

Als ich vor Kurzem Gerüchte vernahm, in einer Höhle auf Flores sei ein frühmenschliches Skelett gefunden worden, war ich auf eine Überraschung gefasst. Aber ich ließ mir nicht träumen, wie groß – oder eigentlich klein – die Sensation wirklich ist.

Das Skelett aus einer Höhle bei Liang Bua stammt von einem erwachsenen Hominiden, der nur etwa einen Meter groß war. Auch sein Gehirnvolumen betrug mit 380 Kubikzentimetern nicht einmal ein Drittel des durchschnittlichen Werts beim modernen Menschen und auch viel weniger als beim *H. erectus* aus Dmanisi.

Der Flores-Schädel frappiert durch seine einzigartige Kombination alter und moderner Merkmale. Die Hirngröße würde zu einem Schimpansen passen. Der flache Schädel mit dem starken Oberaugenwulst und der kinnlose Unterkiefer sind typisch für frühe Hominiden. Dagegen wirkt das Gesichtsskelett klein und zart wie beim modernen Menschen. Es steht nicht vor, sondern scheint gleichsam unter das Gehirn geschoben. Die Zähne sind ungefähr so groß wie unsere.

Kurios aus Alt und Neu zusammengewürfelt wirkt auch das übrige Skelett. Der erhaltene Hüftknochen ähnelt dem von Australopithecinen, afrikanischen Vormenschen wie der berühmten »Lucy«. Doch die Schenkel sind schmal, und das Wesen ging, wie die vorhandenen Knochenfragmente zeigen, mit Sicherheit auf zwei Beinen wie wir.

Schwierige Klassifikation

Was für ein seltsames Geschöpf war das also, und was machte es auf Flores? Peter Brown, ebenfalls von der Universität von Neu-England, und Morwood, die zusammen mit ihren jeweiligen Mitarbeitern das Fossil und die Fundsituation jetzt in zwei Artikeln in Nature beschreiben *(Bd. 431, S. 1055 und 1087)*, mussten bei der Klassifikation einige schwierige Entscheidungen fällen. Fest stand nur, dass ein moderner Mensch ausschied. Ansonsten legten das kleine Gehirn und die Form des Hüftknochens einen Australopithecinen nahe. Proportionen und Form des Schädels sprachen dagegen für einen frühen *H. erectus*.

Angesichts der einzigartigen Merkmalskombination entschieden sich die Autoren, das Skelett als Vertreter einer neuen Art zu klassifizieren – auch dies eine beliebte Praxis, die dem Fund grö-

In manchen Merkmalen ähnelt der jetzt entdeckte Schädel des Zwergmenschen von Flores (links) dem des modernen Menschen. So ist sein Gesichtsskelett flach und zartgliedrig. Andere Merkmale wie die Oberaugenwülste und das fehlende Kinn weisen auf Früh- oder Vormenschen hin. Das Gehirn ist sogar so klein wie das eines Schimpansen.

ßere Bedeutung verleiht und dem Finder die heikle Zuordnung erspart, aber hier sicherlich gerechtfertigt ist. Das Skelett aus der Höhle bei Liang-Bua, höchstwahrscheinlich eine Frau, erhielt den wissenschaftlichen Namen *Homo floresiensis*, also »Flores-Mensch«.

Von ihm stammen nach Ansicht der Forscher auch die in der Höhle ausgegrabenen Steinwerkzeuge. Mit ihnen dürfte er unter anderem eines der wenigen anderen Säugetiere gejagt haben, die es ebenfalls auf die Insel geschafft hatten: eine Zwergform der ausgestorbenen Elefantengattung *Stegodon*.

Als wäre all das nicht sensationell genug, lieferte die Datierung eine weitere handfeste Überraschung: Zwei verschiedene Verfahren ergaben übereinstimmend ein Alter von nur rund 18000 Jahren für das Skelett. Demnach verkörpert es späte Nachfahren von Frühmenschen, wohl eine Form des *H. erectus*, die wahrscheinlich schon vor einer Million Jahren auf die Insel kam, als sie zum Beispiel Elefanten verfolgten. Ob sie primitive Boote benutzten oder eine Landbrücke, die für kurze Zeit existierte, bleibt offen.

Räumliche Isolation und Inzucht ließen die Nachkommen dieser Gruppe immer kleinwüchsiger werden. Paläontologen kennen bei Säugetieren eine Reihe von Beispielen dafür, dass sich auf Inseln Zwergformen entwickeln. *Stegodon* auf Flores war ein solcher Fall.

In ihrer abgeschiedenen Welt überdauerten die merkwürdigen Frühmenschen viel länger als *H. erectus* in Asien oder selbst der Neandertaler in Europa. Was ihre geheimnisvolle Geschichte schließlich beendete, ist unklar – möglicherweise eine Klimaänderung oder der moderne Mensch, der vor rund 100000 Jahren von Afrika aus in den Rest der Welt vorzustoßen begann. Er muss seine kleinwüchsigen Verwandten jedenfalls noch getroffen haben.

Trotz mancher Lücken und Unsicherheiten glaubten die Paläanthropologen die menschliche Evolution in den Grundzügen zu kennen. Der Fund der Zwerghominiden von Flores bringt diese Überzeugung zum Einsturz und führt uns drastisch vor Augen, wie wenig wir doch letztlich über die Geschichte unserer Art wissen.

Chris Stringer ist Paläontologe am Naturhistorischen Museum in London.

ELEKTRONIK

Konkurrenz für Silizium?

Ein Durchbruch bei der Herstellung hochreiner Kristalle aus Siliziumkarbid könnte eine neue Ära der Elektronik einläuten.

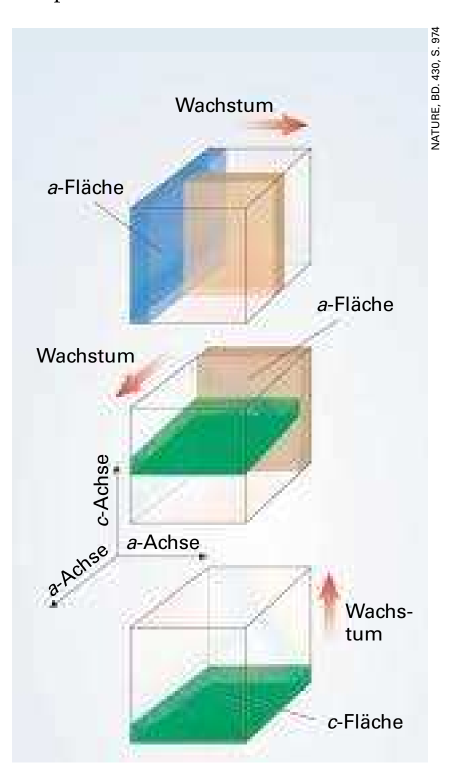
Von Stefan Maier

Die Idee ist gut, doch die Welt noch nicht bereit« – obwohl das deutsche Poptrio Tocotronic bei dieser Liedzeile eher ein gerechteres Gesellschaftsmodell im Sinn hatte, trifft sie auch auf viele technische Erfindungen zu. Vor allem in der modernen Kommunikations- und Elektronikindustrie ist die Verwirklichung schon so mancher Vision daran gescheitert, dass die dafür nötigen Werkstoffe fehlten – zum Beispiel hochreine Kristalle aus exotischen Halbleitern jenseits des Siliziums.

Der Weg zu einigen der größten Durchbrüche im letzten Jahrzehnt wurde denn auch von den Materialwissenschaften geebnet. Man denke nur an die Erfolge bei der Herstellung von Nitritkristallen Mitte der 1990er Jahre, die erst den Bau blauer Leuchtdioden ermöglichten – Voraussetzung für kompakte blaue und ultraviolette Laser, die inzwischen routinemäßig in der Telekommunikation, der medizinischen Diagnostik und in Bildschirmen eingesetzt werden.

Einen vergleichbaren Durchbruch haben nun Daisuke Nakamura und seine Kollegen an den Forschungslaboratorien von Toyota in Aichi (Japan) erzielt. Mit einem eleganten neuen Verfahren gelang ihnen erstmals die Herstellung hochreiner Kristalle aus dem Halbleiter Siliziumkarbid *(Nature, Bd. 430, S. 1009)*. Dies könnte einen seit den 1950er Jahren gehegten Traum wahr werden lassen: Elektronikchips, die weit höhere Stromleistungen vertragen als die heutigen aus Silizium.

All die günstigen Eigenschaften, denen das Standardmaterial der Halbleitertechnologie seine marktbeherrschende Stellung verdankt, verflüchtigen sich nämlich bei hohen Temperaturen, Frequenzen oder Strömen. Und genau da brilliert Siliziumkarbid. Mit seiner wabenartigen Schichtstruktur übertrifft es bei hohen Belastungen das Silizium nämlich in fast allen für die Elektronik wichtigen Belangen und könnte so die Basis einer Hochleistungselektronik mit maßvollem Energieverbrauch bilden. Energiezehrende Kühlung wäre entbehrlich, und Orte mit hoher Hitze- oder Strahlungsbelastung würden zugänglich. Chips aus Siliziumkarbid könnten zum Beispiel als Sensoren in Triebwerken von ▷



Bei dem neuen Verfahren zur Herstellung von Siliziumkarbid lässt man den Kristall zunächst in Richtung der einen *a*-Achse wachsen. Dann schneidet man ein Stück heraus und setzt den Wachstumsprozess längs der anderen *a*-Achse fort. Ein Plättchen aus diesem neuen Kristall dient schließlich als Basis für das endgültige Wachstum entlang der *c*-Achse.

▷ Flugzeugen dienen. Außerdem wären sie ideal für Satelliten im Weltraum, wo der Beschuss durch kosmische Teilchen die Lebensdauer herkömmlicher Siliziumbauteile erheblich verkürzt.

Bisher war die Herstellung hochreiner Kristalle aus Siliziumkarbid allerdings ein Problem. Die etablierten, seit vielen Jahrzehnten immer weiter verfeinerten Züchtungsverfahren der Halbleiterindustrie versagen bei diesem Material. Es zersetzt sich nämlich beim Schmelzen – im Gegensatz zu Silizium und Galliumarsenid, das vor allem für optoelektronische Bauteile verwendet wird. Deshalb lässt es sich nicht aus der flüssigen Phase auf einem Keimkristall abscheiden.

Perfektes Gitter

Die Forscher mussten also andere Methoden ersinnen. Das seit dem Ende der 1970er Jahre praktizierte Verfahren für Siliziumkarbid ist die Züchtung aus der Gasphase. Dabei schlägt man das zuvor verdampfte Material auf einem Keimkristall nieder und lässt ihn auf diese Weise senkrecht zu den Silizium- und Kohlenstoffebenen in Richtung der so genannten *c*-Achse wachsen.

So erhält man zwar Scheiben – so genannte Wafer – mit Durchmessern von mehreren Zentimetern. Doch haben sie nur geringe Qualität, weil die Kristalle viele Fehlstellen aufweisen: »Dislokationen«, bei denen Gitterebenen gegeneinander verschoben sind, und kleine Hohlräume parallel zur *c*-Achse, die als Mikroröhren bezeichnet werden. Selbst die besten mit dieser Methode hergestellten Siliziumkarbidwafer enthalten noch sehr viele solche Baufehler: etwa hundert bis tausend Dislokationen und zehn bis hundert Mikroröhren pro Quadratzentimeter. Diese behindern den Fluss der Elektronen, sodass das Material seine Vorteile gegenüber Silizium einbüßt – zum Leidwesen der Physiker und Elektrotechniker, die für die Umsetzung ihrer Ideen auf hochwertige Kristalle angewiesen sind.

Nakamuras Team umgeht die Nachteile des bisherigen Verfahrens mit einem Trick, der allerdings erst einmal das Gegenteil erreicht: Es entstehen mehr Fehlstellen als mit der herkömmlichen Methode. Die japanischen Forscher lassen ihren Kristall nämlich nicht entlang der *c*-Achse wachsen, sondern in Richtung einer der beiden die Wabenstruktur aufspannenden *a*-Achsen (siehe Bild S. 15) – obwohl seit Langem bekannt ist, dass dabei mehr Baufehler auftreten. Wegen der Störungen, die im Keimkristall von Beginn an vorhanden sind, ergibt sich eine wellblechartige Struktur, die mit Dislokationen gespickt ist.

Durch Experimente mit Röntgenstrahlen haben die Wissenschaftler jedoch herausgefunden, dass sich die Fehlstellen bevorzugt parallel zur Wachstumsrichtung in der Wabenebene bilden – in der Senkrechten dazu entstehen dagegen praktisch keine Defekte. Deshalb unterbrechen die Forscher – und das ist der Clou – den Züchtungsvorgang nach einer Weile, drehen den Kristall und lassen ihn in Richtung der anderen *a*-Achse weiter wachsen. Dabei entsteht nun ein Gitter mit weniger Baufehlern, da entlang dieser Achse im ersten Schritt kaum Störungen aufgetreten sind. Durch mehrmaliges Unterbrechen und Fortsetzen des Wachstums in zueinander senkrechten Richtungen kann so ein Kristall mit nur wenigen Fehlstellen hergestellt werden, weil die jeweilige Ausgangsfläche immer perfekter wird.

Diesen Kristall lassen die Forscher zum Schluss noch wie bei der herkömmlichen Methode entlang der *c*-Achse wachsen. Da die Basisebene dank der raffinierten Methode nunmehr so gut wie keine Fehler aufweist, entsteht auch in *c*-Richtung ein weit gehend perfektes Gitter. Dadurch enthalten die Kristalle etwa hundert- bis tausendmal weniger Fehlstellen als beim herkömmlichen Verfahren. Dank dieser hohen Qualität taugen sie nun als Baumaterial für elektronische Chips.

Noch sind sie allerdings nicht groß genug. Nakamuras Kristalle haben nur Durchmesser von wenigen Zentimetern, während die Siliziumwafer für die Elektronikindustrie mehrere Dezimeter im Querschnitt messen. Doch diese Hürde sollte relativ leicht zu nehmen sein. Die japanischen Forscher spekulieren zudem, dass sich ihre Wachstumsmethode auch für andere Halbleiter mit wabenartiger Kristallstruktur eignen könnte. Nach dieser Steilvorlage der Materialforscher ist der Ball nun wieder bei den Physikern und Ingenieuren. Sie haben endlich freie Bahn, ihre Vision einer Siliziumkarbid-Elektronik zu verwirklichen.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

GLOSSE

Tod durch Musik?

Wissenschaft ist eine tiefernste Angelegenheit. Als Lohn für ein Leben, das sich zur Erforschung der Naturgesetze berufen fühlt, winkt wenigen Auserwählten – sofern sie lange genug leben – eine feierliche Zeremonie mit Frackzwang, Streichquartett und Festbankett, in deren Verlauf ein echter König eine Urkunde, eine Medaille und einen saftigen Scheck überreicht. Das ist nicht komisch. Nur ein Kindskopf würde sich etwa darüber erheitern, dass diesmal drei Amerikaner geehrt wurden, die verschiedenfarbige und mit einer Art ultimativem Hartkleber verleimte Quarkbällchen als Grundbausteine unserer Welt identifiziert haben.

Und doch. Jahr für Jahr zeichnet, von der Öffentlichkeit wenig bemerkt, in den USA ein unnobles Komitee Forscher für den Mut aus, tief in die Grauzone zwischen ernster Wissenschaft und blühendem Unsinn vorzustoßen. Offene Fragen gibt es genug, die Neugier kennt kein Halten, und manchmal wissen Forscher in ihrem Furor vielleicht selbst nicht mehr, ob sie sich heillos verrannt haben oder bloß verteufelt originell sind.

Der so genannte Ig-Nobel-Preis, den die unernste Zeitschrift »Annals of Improbable Research« nun schon zum 14. Mal verlieh, ging in der Sparte Medizin diesmal an zwei Soziologen für ihre Studie »The Effect of Country Music on Suicide«. Steven Stack von der Wayne State University in Detroit (Michigan) und Jim Gundlach von der Auburn University (Alabama) konnten in 49 Großstädten, deren Bürger besonders intensiv von dieser Art Musik berieselt werden, einen statistischen Zusammenhang mit der Selbstmordrate nachweisen: Je mehr Country-Songs die örtlichen Radio- und Fernsehstationen spielten, desto mehr weiße Einwohner schieden freiwillig aus dem Leben. Unterschiede in der Scheidungsrate, dem sozioökonomischen Status und dem Zugang zu Schusswaffen ließen sich als Ursache ausschließen. So blieb allein der Hillbilly-Faktor *(Social Forces, Bd. 71, S. 211, 1992).*

Stack und Gundlach sind aber nicht bloß Statistiker, sondern auch Soziologen. Also gehen sie den gesellschaftlichen Ursachen des Phänomens auf den Grund. Dabei betreten sie wissenschaftliches Neuland, denn sie müssen feststellen: »Über die Einwirkung von Musik auf soziale Probleme ist nur wenig empirische Arbeit geleistet worden.« Zwar gebe es ein paar Studien zur Verbindung von Musik mit kriminellem Verhalten, aber der Zusammenhang mit dem Freitod sei praktisch unerforscht. Die Wirkung von Kunst auf tiefe Lebensunlust werde höchstens anhand von Fernsehfilmen und Seifenopern untersucht.

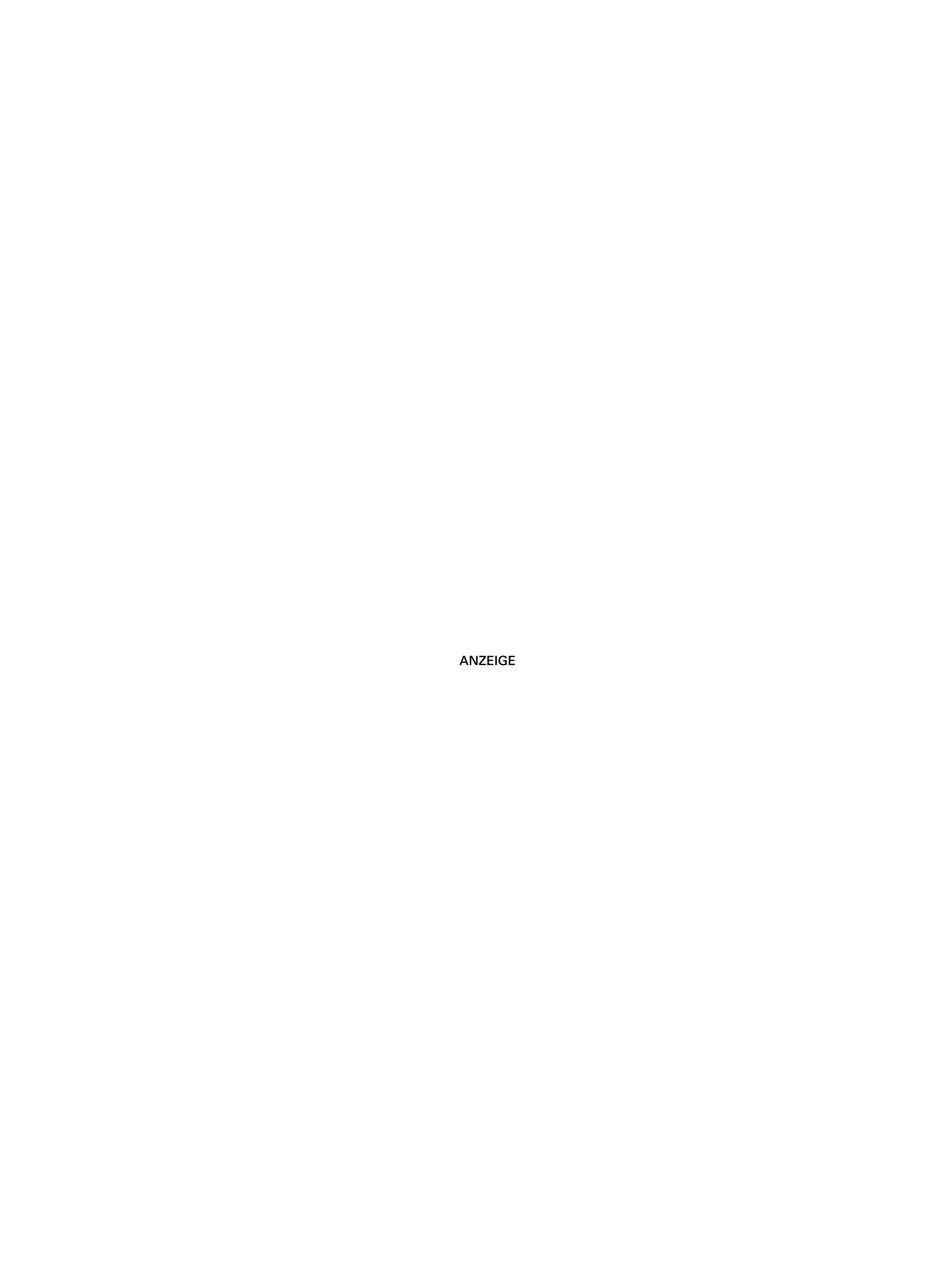
Doch auch die Ig-Nobel-Soziologen greifen bei der Deutung der durch Country-Musik ausgelösten Todesbereitschaft zu kurz – versuchen sie den Effekt doch nur mit den Liedtexten zu erklären. Darin gehe es, so ihr Befund, vor allem um Eheprobleme, Alkoholmissbrauch und Arbeitslosigkeit. Die Wirkung der Musik selbst aber vernachlässigen sie völlig. Schließlich kann die nölend-quengelnde Eintönigkeit des Country-Gedudels selbst psychisch Kerngesunde bei lang anhaltender Beschallung zur Verzweiflung treiben.

Leider versäumen Stack und Gundlach auch, den Film »Mars attacks!« in ihre Analyse einzubeziehen. Dort kann eine Invasion technisch weit überlegener Außerirdischer nur deshalb abgewendet werden, weil ihnen, wenn sie Country-Musik hören, sofort der Schädel platzt.

Aber so schreitet die Wissenschaft eben fort: von einer unvollkommenen Entdeckung zur nächsten.

Michael Springer

Der Autor ist ständiger freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.


ANZEIGE

METEOROLOGIE

Wirbelstürme im Aufwind

Warum nimmt nach Jahrzehnten relativer Ruhe die Zahl und Stärke der Hurrikane wieder zu?

Von Mark Alpert

Die Bewohner Floridas werden die Hurrikansaison 2004 lange in Erinnerung behalten. Von Anfang August bis Ende September bildeten sich im Nordatlantik sechs starke Wirbelstürme der Kategorie 3 – mit maximalen Windgeschwindigkeiten von 178 Kilometer pro Stunde – oder höher. Vier davon – Charley, Frances, Ivan und Jeanne – fegten über den Sonnenstaat hinweg. Das Auge von Ivan traf zwar in Alabama auf die Küste, aber die Wirbelarme verwüsteten auch das benachbarte Florida.

Dass Amerikas »Pfannenstiel« zur Zielscheibe der diesjährigen Hurrikane wurde, war wohl mehr oder weniger ein unglücklicher Zufall – die Zugbahnen der atlantischen Wirbelstürme hängen von dem chaotischen Muster ab, nach dem sich die Hoch- und Tiefdruckgebiete längs der amerikanischen Ostküste verteilen. Trotzdem sind viele Forscher davon überzeugt, dass die Zahl der starken Hurrikane im Atlantik insgesamt zunimmt.

Seit 1995 beträgt sie im jährlichen Mittel 3,8; das ist signifikant mehr als der 60-Jahres-Durchschnitt von 2,3. Tatsächlich scheint die Häufigkeit starker Hurrikane in einem jahrzehntelangen Rhythmus zu schwanken: Von den späten 1920ern bis zu den 1960ern war sie hoch, von 1970 bis 1994 dagegen niedrig. Seither ist sie wieder gestiegen.

Die Oszillation verläuft allerdings keineswegs glatt: Die Hurrikanaktivität im Atlantik variiert kräftig von Jahr zu Jahr. Weltweit gesehen, ist die Zahl starker Wirbelstürme dagegen erstaunlich konstant. Eine lebhafte Saison im Atlantik wird gewöhnlich von einer ruhigen im Pazifik ausgeglichen und umgekehrt. Freilich versagte auch diese Regel im vergangenen Jahr. Während vier schwere Hurrikane den Osten der USA heimsuchten, wütete zugleich eine ungewöhnliche Serie heftiger Tornados über Japan.

Die jährlichen Schwankungen hängen nach Ansicht vieler Forscher mit dem Auftreten von El-Niño-Ereignissen zusammen, bei denen sich der östliche Pazifik erwärmt. Dadurch verstärkt sich der Geschwindigkeitsunterschied zwischen hohen und tiefen Luftströmungen, was die Bildung von Hurrikanen im Atlantik stören sollte. Die Abkühlung des Stillen Ozeans durch La Niña dürfte den entgegengesetzten Effekt haben. Die Gründe für längerfristige Hurrikantrends sind dagegen mysteriöser.

Einige Wissenschaftler vermuten einen Zusammenhang mit Trends in der Thermodynamik des Atlantischen Ozeans. Hurrikane bilden sich nur über Wasser, das wärmer als 26,5 Grad Celsius ist. Tatsächlich herrschten in der Karibik während der Jahrzehnte mit überdurchschnittlicher Hurrikanaktivität relativ hohe Oberflächentemperaturen, wäh- ▷

▼ Der Hurrikan Charley zerstörte große Teile von Charlotte (Florida). Der Sturm der Kategorie 4 war am 13. August 2004 auf die Ostküste der USA getroffen.

JIM REED PHOTOGRAPHY

rend in der ruhigen Periode das Meer kühler war. William M. Gray, ein Veteran der Wirbelsturmforschung an der Colorado State University in Fort Collins, sieht den Grund dafür in globalen Ozeanströmungen. Sie verfrachten warmes salzhaltiges Wasser aus dem tropischen Atlantik bis weit in den Norden, wo es schließlich absinkt und in der Tiefe zurückströmt. Wenn das Förderband dieser thermohalinen Zirkulation auf Hochtouren läuft, erwärmt sich der Nordatlantik, und mehr starke Wirbelstürme entwickeln sich; erlahmt es dagegen – vielleicht weil Süßwasser von schmelzendem arktischem Eis zuströmt –, nimmt die Hurrikanaktivität ab. Laut Gray muss sich der Osten der USA in den kommenden zwanzig bis dreißig Jahren auf überdurchschnittlich viele starke Wirbelstürme gefasst machen. »Ich werde nicht mehr leben, wenn es vorbei ist«, sagt der 74-jährige Forscher.

Anderen Wissenschaftlern erscheint diese Erklärung jedoch zu simpel. So weist der Meteorologe Kerry A. Emanuel vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge darauf hin, dass nicht nur die Wassertemperatur darüber entscheidet, ob ein Hurrikan entsteht, sondern auch die Temperaturdifferenz zwischen der Meeresoberfläche und der oberen Atmosphäre.

Der Klimatologe James B. Elsner von der Florida State University in Tallahassy glaubt ebenfalls, dass weitere Faktoren eine Rolle spielen. Insbesondere sieht er einen Zusammenhang mit der Nordatlantischen Oszillation (NAO), welche das regionale Klimasystem zwischen zwei Zuständen hin- und herpendeln lässt. Dadurch verschieben sich jeweils die Zugbahnen von Stürmen, die den Ozean überqueren.

In welcher Phase sich die Oszillation gerade befindet, lässt sich am so genannten NAO-Index ablesen, der als Druckgefälle zwischen Azoren-Hoch und Island-Tief definiert ist. Wenn er kleiner wird, dehnt sich das Azoren-Hoch zu den Bermudas hin aus; das hindert die Hurrikane daran, nach Norden abzudrehen. So bleiben sie über relativ warmem Wasser, gewinnen dadurch an Stärke und ziehen auf die Karibik und den Südosten der USA zu. Tatsächlich ist der NAO-Index Ende Juli – genau bevor sich die Wirbelstürme im Atlantik häuften – dramatisch gesunken.

Was auch immer der Grund für die turbulente Hurrikansaison 2004 war – die großen Schäden in Florida rühren auch daher, dass die Meeresküste dort und in anderen Staaten im Südosten der USA während der 25 Jahre dauernden Phase relativer Ruhe zu dicht besiedelt wurde. Weil sich momentan ein schwacher El Niño anbahnt, dürfte die nächste Hurrikansaison friedlicher verlaufen. Aber danach könnten katastrophale Stürme mit Macht zurückkehren. Elsner sagt: »Manches deutet darauf hin, dass 2004 nur ein Vorgeschmack war.«

Mark Alpert ist Redakteur bei Scientific American.

EVOLUTION

Der Ring des Lebens schließt sich

Stammen wir ursprünglich von Bakterien ab? Oder liegen unsere Wurzeln bei den Archaeen, den Spezialisten für Extrembedingungen? Sowohl als auch, sagt ein neues Bild der frühen Evolution.

Von Michael Groß

Den Stammbaum des Lebens zu ergründen gehört seit Darwin zu den großen Zielen der Biologie. Anfangs konnten sich die Systematiker dabei nur auf Gestaltmerkmale von existierenden oder fossil überlieferten Organismen stützen. Manchmal aber führen diese äußerlichen Zeichen in die Irre – etwa dort, wo die so genannte konvergente Evolution ähnliche Strukturen unter analogen Umweltbedingungen mehrmals hervorgebracht hat. Und noch öfter bleiben sie mehrdeutig. Im Reich der Mikroben zum Beispiel gibt es nur wenige »Baustile«, die folglich kaum etwas über verwandtschaftliche Beziehungen verraten.

Doch in den 1970er Jahren erschloss sich der Familienforschung ein viel versprechendes neues Feld: das der Moleküle. Zuerst war es die Abfolge der Aminosäurebausteine in Proteinen, die sich analysieren, vergleichen und für die Ableitung von Abstammungslinien heranziehen ließ. Auf diese Weise gelang es, einige knifflige Verwandtschaftsfragen zu lösen. Allerdings stellt sich auch hier das Problem der konvergenten Evolution: Zwei nicht miteinander verwandte Organismen können unter ähnlichem Selektionsdruck ähnlich aufgebaute Eiweißstoffe entwickeln. Außerdem ist die Sequenzierung von Proteinen mühsam und Zeit raubend.

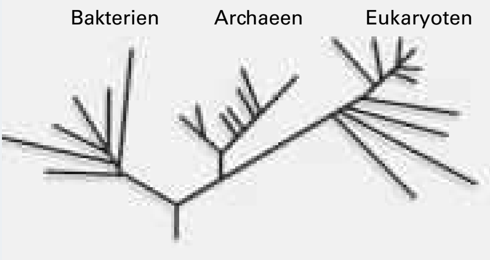
Mit dem Übergang zu den Genen verbesserte sich die Situation dramatisch. Die Voraussetzung dafür schuf in den 1980er Jahren die Entwicklung effizienter Methoden zum Vervielfältigen und Sequenzieren von DNA-Stücken. Einer, der es gar nicht erwarten konnte, war Carl R. Woese an der Universität von Illinois in Urbana-Champaign. Selbst in den 1970ern, als sich nur sehr kurze Fragmente von Nucleinsäuren zuverlässig analysieren ließen, benutzte er schon die in den Eiweißfabriken der Zelle enthaltene ribosomale RNA zur Bestimmung der Verwandtschaftsverhältnisse.

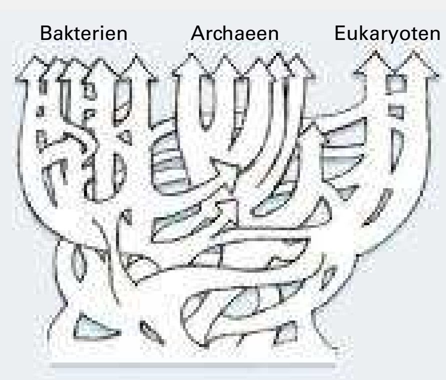
Bis dahin galt als gesichert, dass sich die heute existierenden Organismen in zwei große Reiche gliedern: Prokaryoten und Eukaryoten, also Lebewesen ohne und mit Zellkern. Erstere umfassen die Bakterien, Letztere alle anderen Organismen. Woese entdeckte jedoch überra-

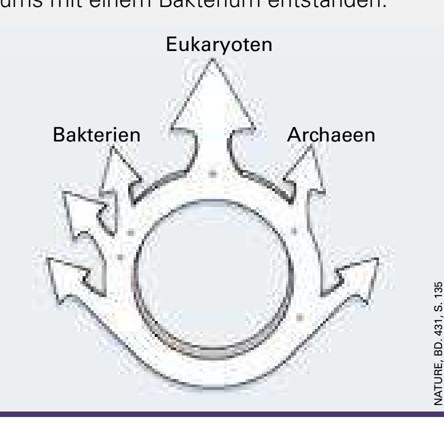
Die Bäckerhefe war in die neue Untersuchung über die Abstammung der eukaryotischen (mit Zellkern ausgestatteten) Organismen eingeschlossen, weil sie zu deren ältesten Vertretern zählt und ihr Erbgut komplett entziffert ist.

Welcher Stammbaum ist der richtige?

Die stammesgeschichtliche Beziehung zwischen den drei großen Organismenreichen – Bakterien, Archaeen und Eukaryoten – war lange umstritten. Vergleiche einzelner Gene ergaben herkömmliche Stammbäume wie den links oben, die sich aber je nach Gen unterschieden, weil im Mikrobenreich Gene auch zwischen fremden Arten ausgetauscht werden können. Diesen horizontalen Gentransfer versucht der Stammbaum links unten zu berücksichtigen. Eine neue Analyse ergab dagegen jetzt das rechts unten gezeigte ringförmiges Verwandtschaftsmuster, bei dem die Eukaryoten durch Verschmelzung eines Archaeums mit einem Bakterium entstanden.







NATURE, BD. 431, S. 135

schend, dass die Prokaryoten in zwei Gruppen zerfallen, die so wenig miteinander verwandt sind wie die Bakterien mit den Eukaryoten. Aus den zwei großen Urreichen waren drei geworden.

Spätere Studien an unzähligen Genen und vollständigen Genomen, durch die rasanten Fortschritte in der Molekularbiologie ermöglicht, bestätigten Woeses Erkenntnis. Doch die Antwort auf zwei Fragen blieben auch diese Untersuchungen schuldig: Wie sind die drei dicksten Äste am Stammbaum des Lebens zueinander angeordnet, und wo ist die Wurzel? Analysen verschiedener Gene erbrachten widersprüchliche Ergebnisse. So wurde immer deutlicher, dass die Vererbung entlang der senkrechten Abstammungslinien in einem normalen Stammbaum die Frühgeschichte des Lebens auf der Erde nicht befriedigend erklären kann.

In der Welt aus Mikroorganismen, die zunächst über Jahrmilliarden hinweg existierte, spielte der Austausch von Genen zwischen verschiedenen Arten, der so genannte horizontale Gentransfer, offenbar eine große Rolle. Auch heute tritt er im Mikrobenreich noch gelegentlich auf und ist zum Beispiel für die Ausbreitung von Antibiotika-Resistenzen verantwortlich. Wenn aber der Genpool einer Art sich nicht durch Mutation und Selektion über die normale Vererbung fortentwickelt, sondern durch Aufnahme von Material aus fremden Spezies, muss jeder Versuch scheitern, auf der Basis ausgewählter Gene einen einheitlichen Stammbaum zu konstruieren. Ein umfassenderer Ansatzpunkt ist vonnöten.

Den lieferten jetzt Maria Rivera und James Lake von der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Die beiden Forscher verglichen die vollständigen Genome von zehn repräsentativen Organismen aus allen drei Urreichen mit dem neuartigen statistischen Verfahren der »bedingten Rekonstruktion« *(conditioned reconstruction)*. Es beurteilt den Grad der Verwandtschaft zwischen zwei Arten auf der Basis ihrer gemeinsamen Gene – gleich ob diese durch normale Vererbung, horizontalen Transfer oder Verschmelzung kompletter Genome erworben wurden.

Bei diesem Verfahren dient ein Genom als Referenz *(conditioning genome)* und taucht dann selbst in dem resultierenden Stammbaum nicht auf. Daraus ergibt sich eine einfache Kontrollmög- ▷

lichkeit: Man benutzt der Reihe nach verschiedene Genome als Bezugspunkt und überprüft, ob die sich ergebenden Stammbäume übereinstimmen. Rivera und Lake testeten das Verfahren zunächst an einem Satz von Prokaryoten, um sich zu vergewissern, dass es deren bekannte Verwandtschaftsbeziehungen richtig erkennt.

Als sie dann Neuland betraten und Mitglieder aller drei Urreiche in die Rekonstruktion einbezogen, lieferten ihre Berechnungen zunächst eine Reihe »klassischer« Stammbäume (allerdings ohne Wurzel), sortiert nach ihrer Wahrscheinlichkeit. Beim genauen Hinsehen zeigte sich jedoch ein erstaunliches Faktum: Die fünf Kandidaten mit den höchsten Zuverlässigkeitswerten waren nicht wirklich verschieden, sondern nur zyklische Permutationen ein und desselben Grundmusters. Damit ließen sich alle fünf durch eine einzige, ringförmige Struktur darstellen *(Nature, 9.9.2004, S. 152)*.

Doch gelang dies nur dann, wenn die eukaryotischen Organismen in die Analyse einbezogen wurden. Berechnungen ohne sie ergaben dagegen normale, lineare Stammbäume. Folglich sind es die Eukaryoten, die den Ring schließen.

Dieses Ergebnis bringt die Evolution der drei Urreiche auf eine verblüffend einfache Formel: Unsere frühesten eukaryotischen Vorfahren sind aus der Genomfusion zwischen einem Bakterium und einem Archaeon hervorgegangen. Rivera und Lake konnten auch genauer eingrenzen, welche Mikroben diesen historischen Bund eingingen. Es waren offenbar ein Gamma-Proteobakterium – zu dieser Gruppe zählt der Darmbewohner *Escherichia coli* – und ein Eozyt, ein extrem Hitze liebendes Archaeon.

Sklavenhaltung im Mikrobenreich

Das Ergebnis steht im Einklang mit früheren Erkenntnissen, wonach in Eukaryoten diejenigen Gene, die für die Vervielfältigung, das Ablesen und Umsetzen der Erbinformation zuständig sind, die größte Ähnlichkeit zu entsprechenden DNA-Sequenzen der Archaeen haben, während etwa die Gene für den Stoffwechsel bakteriellen Ursprungs zu sein scheinen. Rivera und Lake hatten diese Zwitternatur des eukaryotischen Erbguts schon 1998 entdeckt, und eine Gruppe um William Martin an der Universität Düsseldorf konnte sie kürzlich anhand umfassender Genomanalysen bestätigen *(Molecular Biology and Evolution, 9/2004, S. 1643)*.

Schon recht lange gibt es außerdem die Hypothese, wonach der Urahn unserer Zellen sich ein Bakterium einverleibt und auf Dauer als eine Art Sklave behalten hat. Aus diesem »Endosymbionten«, der seine ursprüngliche Eigenständigkeit zunehmend einbüßte und sein Erbmaterial großenteils an den Zellkern verlor, soll sich schließlich das Mitochondrium entwickelt haben, das heute für den Energiestoffwechsel zuständig ist.

Auch dazu passen die neuen Befunde von Rivera und Lake. Zwar erlaubt deren Analyse keine eindeutige Aussage darüber, ob die festgestellte Genomverschmelzung aus einer Endosymbiose hervorgegangen ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist jedoch groß.

Nun steht nur noch eine grundlegende Frage im Raum: Wie ist der Ring mit dem letzten gemeinsamen Vorfahren aller Lebewesen verbunden, den die Forscher auf den Namen Luca getauft haben (nach englisch *last universal cellular ancestor*)? Die Antwort darauf wird sicher noch schwerer fallen, erscheint aber zumindest theoretisch möglich.

Bei Luca selbst dagegen endet definitionsgemäß die Reichweite der molekularen Familienforschung: Wo es keine abweichenden Vererbungslinien zu vergleichen gibt, kann auch die beste statistische Methode nicht greifen. Die Entwicklung des Lebens bis dahin müssen wir also auf andere Art zu rekonstruieren versuchen. Von Luca bis heute hingegen steht unsere Geschichte in unseren Genen. Wir müssen das Nachlesen nur noch ein wenig üben.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker, freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

RAUMFAHRT

Die Rückkehr der Shuttles

Das Moratorium für Shuttle-Flüge nach der Columbia-Katastrophe nähert sich dem Ende. Mit neuen Sicherheitsvorkehrungen und eingeschränktem Einsatzspektrum sollen die Raumfähren im Sommer ihre Flüge wieder aufnehmen.

Von Mark Alpert

Nasa-Techniker im Kennedy-Raumfahrtzentrum arbeiten mit Hochdruck daran, die Raumfähre Discovery auf den nächsten Start vorzubereiten. Ursprünglich war er schon für März vorgesehen, aber die schweren Wirbelstürme über Florida im vergangenen Spätsommer richteten auch auf dem US-Weltraumbahnhof größere Schäden an. Deshalb musste die Wiederaufnahme der Shuttle-Flüge, die nach dem tragischen Unglück der Columbia im Februar 2003 unterbrochen worden waren, auf den Frühsommer verschoben werden.

Mit diversen Konstruktionsänderungen will die US-Raumfahrtbehörde einer ähnlichen Katastrophe vorbeugen. Aber nicht alle empfohlenen Maßnahmen werden sich in vollem Umfang verwirklichen lassen. Aus diesem Grund hat die Nasa die Einsatzmöglichkeiten der Fähre vorsorglich eingeschränkt.

Als wichtigste Änderung wurde die Schaumstoff-Isolierung von den Metallstreben entfernt, die das Raumschiff mit dem Treibstofftank verbinden. Ein nur gut ein Kilogramm schweres Stück davon hatte sich beim Start der Columbia gelöst und ein Loch in den Flügel der Fähre geschlagen. Durch dieses Leck war beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre stark erhitztes Gas in das Raumschiff eingedrungen.

Für den Fall, dass von einem anderen Teil des Tanks Schaumstoff abbricht, hat die Nasa Sensoren in die Flügel eingebaut, die den Einschlag von Trümmerstücken registrieren und melden sollen. Außerdem wurde eine Digitalkamera installiert, die Bilder vom Tank liefert, nachdem er sich beim Start von der Fähre getrennt hat.

Andere Sicherheitsmaßnahmen erwiesen sich dagegen als schwerer umsetzbar. In ihrem Bericht zur Columbia-Ka-


PETER COSGROVE, AP PHOTO

Der Count-down läuft: Nasa-Techniker machen die Discovery fit für den nächsten Flug. Hier tauschen sie beschädigte Keramikkacheln des Hitzeschilds an der Unterseite der Fähre aus.

tastrophe vom Juli 2003 empfahl die Nasa-Untersuchungskommission dringend, Möglichkeiten zur Inspektion des Shuttles im All und zur Vor-Ort-Reparatur ernsthafter Schäden zu schaffen.

Die Raumfahrtbehörde begann daraufhin mit der Entwicklung eines Sensorsystems, das über einen Laser-Entfernungsmesser und eine Fernsehkamera verfügt. Es soll am Ende eines fünfzehn Meter langen Masts sitzen, der am Roboterarm der Fähre befestigt werden kann, und bei Bedarf 3-D-Bilder von den Flügeln liefern. Aber kürzlich sprach die Arbeitsgruppe, welche die Fortschritte der Nasa beim Umbau der Raumfähren überwacht, von »enormen Herausforderungen« angesichts des knappen Zeitplans für die Entwicklung dieses Systems.

Raumstation als rettender Hafen

Auch die Vor-Ort-Reparatur von Schäden soll nur eingeschränkt möglich sein. Zwar werden die Astronauten Risse füllen und bis zu zehn Zentimeter große Löcher stopfen können, nicht aber ein Leck von 15 bis 25 Zentimeter Durchmesser, wie es der Columbia zum Verhängnis wurde.

Stattdessen behilft sich die Nasa mit technologisch weniger anspruchsvollen Notlösungen. Bevor die Discovery an der Internationalen Raumstation andockt, soll sie eine Art Salto vollführen, sodass die Besatzung der ISS aus 600 Meter Entfernung die Hitzeschildkacheln auf der Unterseite fotografieren kann. Notfalls muss ein Astronaut einen Weltraumspaziergang unternehmen und sich den Schaden näher ansehen.

Falls er ein Leck entdeckt, das sich nicht ausbessern lässt, wird die Besatzung der Discovery in der Raumstation bleiben und auf die Ankunft der Schwesterfähre Atlantis warten, die innerhalb von 45 Tagen zu einer Rettungsmission aufbrechen könnte. Die Vorräte auf der ISS sollten für einen so langen Aufenthalt reichen, sofern kein kritisches System – etwa für die Sauerstoffversorgung oder Luftfilterung – ausfällt.

Weil die Nasa die Raumstation als sicheren Hafen für Shuttle-Besatzungen vorsieht, hat ihr Direktor Sean O'Keefe eine für 2006 geplante Wartungsmission für das Hubble-Weltraumobservatorium gestrichen. Dieses bewegt sich auf einer völlig anderen Bahn als die ISS, sodass sich auf einem Shuttle-Flug nicht beide zugleich erreichen lassen. Da das Raumteleskop spätestens 2008 ausfällt, sofern die Batterien und Gyroskope nicht ersetzt werden, hat O'Keefe im August grünes Licht für eine Robotermission gegeben, welche die nötigen Wartungsarbeiten durchführen soll. Allerdings sind die geschätzten Kosten von 1 bis 1,6 Milliarden Dollar etwa dreimal so hoch wie die eines Shuttle-Flugs. Außerdem ist der Erfolg nicht garantiert, weil laut einem Bericht der amerikanischen National Academy of Sciences vom Juli für den Roboter viele neue technische Verfahren entwickelt werden müssen.

Ironischerweise könnte die Beschränkung der Shuttles auf Flüge zur Raumstation in Wahrheit riskanter sein als die Reparatur von Hubble. Nach Ansicht von Robert Zubrin, Raumfahrtingenieur und Vorsitzender der Mars-Gesellschaft, drohen bei einem Besuch des Weltraumobservatoriums viel weniger gefährliche Einschläge von Mikrometeoren oder Weltraumschrott, weil man die Fähre so ausrichten kann, dass sie möglichst wenig verwundbar ist. Dagegen bietet sie ihre empfindliche Unterseite ungeschützt dar, während sie angedockt an der ISS parkt. Außerdem sind bis zur Fertigstellung der Raumstation noch mindestens 25 Flüge nötig, für die Hubble-Wartung würde dagegen ein einziger genügen. ◁

Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.

Die motorische Intelligenz des Menschen erweist sich in ihrer ganzen Bedeutung bei großen Interpreten wie Vladimir Horowitz (1903–1989), der noch im hohen Alter konzertierte.

Der Ursprung unseres Verstandes

Die Intelligenz des Menschen drückt sich in der Feinsteuerung der Finger- und Gesichtsmuskulatur aus. Diese überragende motorische Intelligenz, so die These des Autors, gab den Anstoß für unsere kulturelle Evolution.

Von Gerhard Neuweiler

Niemals könnte ein Affe Klavier spielen. Ihm fehlt dazu schon die Möglichkeit, seinen Fingern genügend schnell und genau zu befehlen, die Tasten in rascher, strenger Folge niederzudrücken. Wir Menschen dagegen brauchen selbst als musikalische Laien nicht lange, um zumindest eine kleine Melodie oder ein paar zusammenhängende Akkorde korrekt erklingen zu lassen – vom atemberaubenden Spiel geschulter Pianisten ganz abgesehen.

Dass unsere Fingerfertigkeit, unsere manuelle Geschicklichkeit die anderer Primaten weit überragt, haben die Forscher bei der Suche nach einzigartigen menschlichen Eigenschaften bisher weniger beachtet als einen anderen Unterschied: unser Sprach- oder besser Sprechvermögen. Dabei hängt beides neurobiologisch eng zusammen, wie wir erst seit einigen Jahren wissen. Denn dieselben Hirnzentren liefern die Bewegungsprogramme und Anweisungen für das Sprechen und für unsere Handlungen im Wortsinne.

Die Verhaltensforschung hat im vergangenen Jahrhundert fast alle vermeintlichen Bastionen gestürmt, die den Menschen vom Tier trennen, vom Werkzeuggebrauch über die Kommunikation in Symbolen bis zum abstrahierenden Kategorisieren. Fast durchgehend betrifft das kognitive Leistungen, also Fähigkeiten des Denkens und Begreifens, die auch Tiere in Grundzügen besitzen. Uns blieb einzig die Sprache – kein Affe hat trotz aller Bemühungen je sprechen gelernt. Was einzelne Menschenaffen in der Zeichensprache erlernen, stellt nur einen erzwungenen, angestrengten Ersatz dar, der ihrem sozialen Bedürfnis entgegenkommt, mit einem Betreuer zu kommunizieren.

Nun ist ein Kennzeichen des Sprechens die perfekte Beherrschung der Artikulationsmuskulatur. Auffallenderweise beruht auch unsere Fingerfertigkeit auf einer phänomenalen Feinmotorik. Wir vermögen die beteiligte Muskulatur von Händen und Armen um vieles schneller und genauer abgestimmt anzusteuern als jedes Tier. Das Bemerkenswerte dabei ist, dass sich die verbesserte motorische Kontrolle bereits bei Primaten ankündigt. Ihre Finger werden geschickter und ihre Mimik ausgeprägter. Für Artikulationen nutzen sie diese Fähigkeit aber noch nicht. Erst der Mensch ist zum Sprechen begabt, so wie er allein kompliziertes Handwerk beherrscht. Diese überragende motorische Intelligenz, so meine These, bildete das Fundament für unsere kulturelle Evolution. Sie ist die Grundlage von Sprechen und Handfertigkeit, die soziales Lernen und Erinnern und damit Kultur und Technik ermöglichen. ▷

▷ Diese Behauptung mag verwundern. Schließlich rennen viele Tiere schneller, springen geschmeidiger oder klettern gewandter als wir. Tatsächlich steht ihnen hierzu ein kompliziert verschalteter neuronaler Apparat zur Verfügung, der die Bewegungsanweisungen gibt und seine Befehle auf die Situationen abstimmt. In der Evolution der spezifisch menschlichen motorischen Intelligenz bildete das denn auch die Grundlage, auf der sich unser Sprechvermögen und unsere Handbeherrschung herausbildeten.

Die Bewegungssteuerung der Säugetiere verläuft wesentlich über drei hierarchisch miteinander verbundene neuronale Instanzen (siehe Bild S. 29). Die unterste sitzt im Rückenmark. Dort erzeugen, wie schon bei niederen Wirbeltieren, kleine Neuronennetze – die zentralen Mustergeneratoren – Signale, die etwa das automatische rhythmische Wechselspiel der Beinmuskulatur beim Gehen bestimmen. Die Signale werden dann den motorischen Neuronen übermittelt, deren Ausläufer vom Rückenmark zu den Muskeln ziehen. Somit vermag im Prinzip das Rückenmark allein die Grundbewegung zu erzeugen. Seine Mustergeneratoren sind weit gehend den einzelnen Gelenken zugeordnet. Diese Neuronennetze können sogar selbst Sinnesmeldungen beispielsweise über Hindernisse berücksichtigen und den Bewegungsablauf entsprechend anpassen.

Wenn die Extremität in einer bestimmten Position stillgehalten werden soll, erzeugen diese Neuronennetze passende andere Programme. Welche ihrer Möglichkeiten sie gerade aktivieren müssen, erfahren sie von Bewegungszentren im Nachhirn, der ihnen übergeordneten zweiten Instanz. In diesem hinteren Gehirnteil werden auch Sinnesmeldungen über den aktuellen Stand des Bewegungsablaufs berücksichtigt.

Wo willkürliches Verhalten entsteht

Allerdings gerieten diese Nachhirnzentren während der Evolution höherer Wirbeltiere zunehmend unter den Einfluss des Vorderhirns, genauer gesagt der motorischen Rinde, des Motorkortex. In dieser obersten Instanz für Bewegungsbefehle, die sich sozusagen in einem Band quer über den Scheitel zieht, haben bei den Säugern alle absichtsvollen Tätigkeiten ihren Ursprung, ob nun ein Raubtier zum Sprung ansetzt oder wir beim Sprechen die Zunge bewegen.

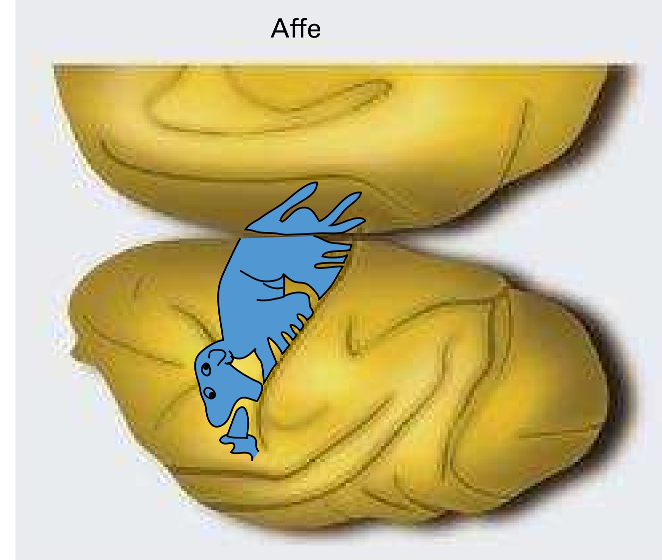
Doch allein, ohne weitere übergeordnete Instanzen würde die Motorrinde keine sinnvollen Bewegungen zu Stande bringen, sondern nur kurze Versatzstücke. Elektrische Reizung an einzelnen Stellen des Motorkortex aktiviert meist nur Kontraktionen einzelner Muskeln. Dafür, dass der Motorkortex brauchbare Anweisungen für koordiniertes, an Bedürfnisse und Umweltsituationen angepasstes Handeln erteilt, sorgen Hirngebiete, die unmittelbar davorliegen: die prämotorischen Areale. Sie liefern die Erregungsprogramme für räumlich und zeitlich abgestimmtes Verhalten und für zielgerichtete Bewegungen. Dort laufen Informationen aus den Sinnesorganen, aus der Muskulatur und von Assoziationszentren im Stirnhirn zusammen.

In den prämotorischen Rindengebieten entstehen auch die Absichten für willkürliche Aktionen, die dann der motorischen Rinde vermittelt werden. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass auch die prämotorischen Areale ihre Anweisungen nicht allein zu Stande bringen, sondern dabei große Hilfe vom Kleinhirn erhalten, das mittels Rückkopplungsschleifen insbesondere über die präzisen Zeitabläufe bei komplizierten Bewegungsabfolgen wacht. Vor allem auch ist das Kleinhirn dann zugeschaltet, wenn Bewegungsprogramme gelernt werden müssen – wie es beim Spiel von jungen Tieren und bei Kindern schon beim Laufenlernen geschieht. Das Kleinhirn ist sozusagen der Trainer, der aufpasst, dass neue Aktionen völlig korrekt gelernt werden, sowohl genau entsprechend der Handlungsabsicht als auch der beabsichtigten Wirkung des Verhaltens (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 60 und 10/2001, S. 36).

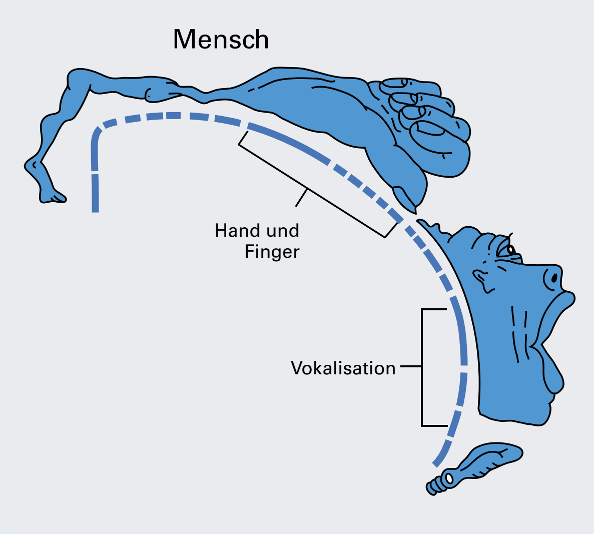
Die vorgestellten drei hierarchischen Ebenen für die Steuerung von Muskeltä-

Der Mensch als Manipulations-/Artikulationswesen

Affe



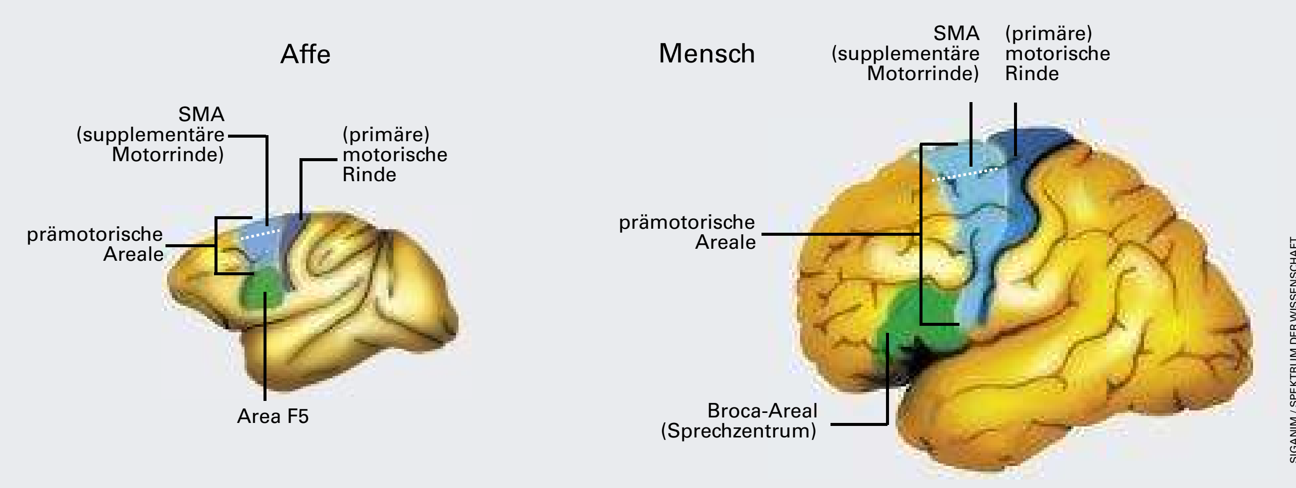
Mensch



Zeichnet man über der Motorrinde eines Affen die Körperteile so groß, wie sie dort repräsentiert sind, kommt dabei ein nur wenig verzerrtes Tier heraus (links). Das Gleiche für den Menschen ergibt den bizarren »motorischen Homunkulus« mit Riesengesicht und Riesenhänden, aber winzigen Beinen (rechts).

SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: KANDEL ET AL., 2000

Vom Handeln zum Sprechen



Einige bei Primaten für die Handlungsgenerierung und -steuerung wichtige Rindengebiete bekommen beim Menschen neue Funktionen beim Sprechen. Die Area F5 der Primaten wurde zum Sprechzentrum (Gehirne nicht maßstabsgetreu).

tigkeit gelten auch für die Säugetiere. Daneben aber bahnt sich bei ihnen etwas ganz Neues an – eine Errungenschaft, die schon das Verhalten der Primaten in vieler Hinsicht verändert, aber beim Menschen schließlich höchste Bedeutung gewinnt. Und zwar entsteht vom Vorderhirn direkt zum Rückenmark sozusagen eine Schnellstraße, welche die Bewegungszentren des Nachhirns umgeht: die cerebrospinale Bahn oder Pyramidenbahn (der Name beruht auf einem charakteristischen Querschnitt einer Teilstrecke dieser Bahn). Ihre neuronalen Fasern kommen etwa zur Hälfte aus der motorischen Rinde, zu einem anderen Teil aus prämotorischen Arealen.

Hintergrund von Virtuosität

Die Fasern der Pyramidenbahn der Säuger ziehen zunächst zu den zentralen Mustergeneratoren im Rückenmark. Das Vorderhirn kann somit direkt auf diese Rückenmarkszentren Einfluss ausüben und dadurch Aktionen leichter steuern.

Bei den Primaten kommt eine weitere Steigerung hinzu. Pyramidenfasern, die Hand- und Fingermuskeln steuern, umgehen jetzt sogar die Mustergeneratoren und innervieren direkt die motorischen Neuronen selbst, die vom Rückenmark zu den Muskeln ziehen. Auf dieser direkten Verbindung zwischen Hirnrinde und Muskelneuron beruht wahrscheinlich die besondere Handfertigkeit von Primaten wie auch des Menschen. Dank dessen können Affen, und wir, Finger und Zehen einzeln – und willentlich – bewegen, was anderen Säugern, zum Beispiel Katzen, nicht gelingt.

Bei beschädigter Pyramidenbahn geht Affen die Geschicklichkeit der Finger verloren. Solche Tiere können nach einer kurzen Erholungsphase wieder laufen und klettern, aber nicht mehr greifen. Umgekehrt ist es ihnen bei Defekten der entwicklungsgeschichtlich älteren Verbindungen über die Nachhirnkerne weiterhin möglich, mit den Fingern Futter aus Löchern herauszupulen. Nun können sie aber nicht mehr gehen. Fortbewegung wird bei ihnen über die stammesgeschichtlich alten Nachhirnzentren vermittelt, Fingerbewegungen jedoch sind auf die stammesgeschichtlich neue Pyramidenbahn angewiesen.

Es fällt auf, dass schon bei Affen die meisten Fasern dieser Schnellstraße ins Rückenmark dort Neuronen ansteuern, die Muskeln der Hände und Finger kontrollieren. Dieses Phänomen verstärkt sich zum Menschen hin. Zudem erhalten bei uns auch die Motoneuronen für die Arm- und Schultermuskeln direkte Befehle sozusagen von ganz oben, aus dem Vorderhirn. Darum kann der Mensch zielgenau werfen, Affen nicht. Das Tier trifft mit dem Hammerschlag nicht einmal einen Nagel.

Die Beine werden über die Pyramidenbahn wesentlich sparsamer versorgt. Bekannt ist der »motorische Homunkulus«, jenes verzerrte Schema eines Menschen, das über den motorischen Kortex gelegt wird, wobei die Größenverhältnisse der einzelnen Körperteile ihrer jeweiligen neuronalen Repräsentanz entsprechen (siehe Bild links). Im Verhältnis zu den Beinen wirken die Hände völlig überdimensioniert. Vor allem die Finger und besonders der Daumen erscheinen riesengroß. Das vergleichbare Schema eines Schimpansen ähnelt wesentlich mehr seinen natürlichen Körperproportionen. Lediglich Hände und Füße sehen viel zu klobig aus. Als hätte er die geringere neuronale Bedeutung der Beine beim Menschen geahnt, schrieb der Dichter und Arzt Gottfried Benn (1886 – 1956) seiner Tochter: »Ich finde schon Gehen eine unnatürliche Bewegungsart, Tiere sollen laufen, aber der Mensch soll reiten oder fahren.«

Doch nicht nur die Kompetenz des Menschen für Handlungen im Wortsinne lässt sich am Homunkulus-Schema ablesen. Das Bild hilft zudem die Evolution der menschlichen Sprechfähigkeit zu erhellen – was Evolutionsbiologen ge- ▷

IN KÜRZE

- Nicht allein kognitive Leistungssteigerung, sondern dazu vor allem unsere hoch entwickelte **motorische Intelligenz** machen uns zum Menschen. Sie ermöglichen komplexes, differenziertes Handeln im Wortsinne und davon hergeleitet die **Sprache**.
- Wesentliche Bausteine der dazu erforderlichen **neuronalen Algorithmen** treten schon bei Affen auf. Doch erst das menschliche Gehirn vermag Aktionselemente prinzipiell unendlich variiert zu beliebig langen **Ketten** zusammenzufügen und hochpräzise zu steuern.

radezu elektrisieren muss. Die groteske Darstellung sieht aus, als würde der Mensch hauptsächlich aus Händen und Gesicht bestehen – einem Gesicht mit einem Riesenmund. Besonders Lippen und Zunge scheinen auf dem Motorkortex ausladend repräsentiert zu sein.

Tatsächlich versorgt beim Menschen ein dicker Ast der Pyramidenbahn die Nerven für die Gesichts-, Lippen-, Zungen- und Gaumenmuskulatur wie auch – das ist einzig unter den Primaten – für die des Kehlkopfs. Schon bei Affen kontrollieren Fasern dieser Schnellstraße Gesichtsmuskeln und damit unter anderem die Mimik. Dieser direkte Einfluss verstärkt sich aber beim Menschen um ein Vielfaches. Hinzu kommt – und dies ist in dem Zusammenhang das Aufregendste –, dass die Feinsteuerung der Gesichtsmuskulatur uns nun erlaubt, Sprachlaute zu formen. Anders gesagt: Die vielfach erhöhte motorische Intelligenz für Gesicht und Hände machte uns zum Menschen.

Primatenkompetenzen auf die Spitze getrieben

Man kann es auch so ausdrücken: Die motorische Geschicklichkeit einer Körperpartie ist umso größer, je ausgedehnter sie auf der motorischen Rinde repräsentiert ist, was bei Affen und beim Menschen vor allem heißt, je mehr Pyramidenfasern sie versorgen. Beim Menschen sind zwei Drittel der Motorkortexoberfläche für Gesicht und Hände zuständig, beim Schimpansen ist es weniger als die Hälfte. Dem entspricht, dass auch im menschlichen Kleinhirn große Flächen für Gesicht und Hände zur Verfügung gestellt werden. Aus Hominiden entstand ein ganz neuer Primat, ein Manipulations-/Artikulationswesen.

Wieso kann ein Schimpanse dann aber nicht wenigstens ein bisschen sprechen oder Klavier spielen lernen? Dies hängt offenbar damit zusammen, dass beide Fertigkeiten mehr motorische Feinkompetenz sowie variablere Bewegungsprogramme und wesentlich längere, zeitlich präzise abgestimmte Bewegungsketten verlangen, als sein Gehirn zu leisten vermag.

Uns gelingen komplizierte, genauestens aufeinander abgestimmte Finger-, Hand- oder Armbewegungen nur nach langem Üben. Das gilt für handwerkliches Geschick ebenso wie für Klavierspielen. Zudem beruht das Erlernen weit gehend auf Nachahmung. Doch auch wenn Menschenaffen den erforderlichen Grad des motorischen Lernens längst nicht erreichen – so verfügen doch alle Primaten über einige bemerkenswerte, noch nicht lange bekannte neuronale Mechanismen, auf denen aufbauend unsere motorische Intelligenz entstanden sein dürfte.

Wie gesagt generieren prämotorische Areale die konkreten Bewegungsabsichten und liefern dem motorischen Kortex die passenden neuronalen Programme. Ein Bereich dieses Vorderhirngebiets von Affen interessiert besonders Neuropsychologen: die Area F5, die bei bestimmten Hand- und Mundaktionen mitwirkt. Sie ist weit gehend deckungsgleich mit dem Sprechzentrum des Menschen, dem Broca-Areal. Dass das Broca-Areal nicht nur beim Sprechen, sondern auch bei Hand- und Fingeraktivitäten involviert ist, stellte sich erst in jüngster Zeit heraus und macht dieses Hirngebiet umso spannender für unser Verständnis der Menschenevolution.

Die Area F5 der Affen hingegen beteiligt sich mitnichten an Lautäußerungen. Andererseits haben die dortigen Neuronen durchaus höhere Funktionen. Sie feuern nämlich nicht generell bei jeder beliebigen Hand- oder Mundbewegung, sondern nur bei gezielten, obendrein gelernten Aktionen an und mit Objekten. Interessanterweise teilen sie sich dabei noch in einer Reihe verschiedener Aufgaben. Die meisten Zellen der Area F5 sind in irgendeiner Weise für Greifen zuständig. Viele von ihnen repräsentieren beispielsweise das vorsichtige Anfassen mit Daumen und Zeigefinger, andere den kraftvollen Zugriff mit der ganzen Hand. Wieder andere sind nur auf Teile einer Bewegung spezialisiert, wie das Schließen von Daumen und Zeigefinger, und dergleichen mehr.

Demnach stellen die Zellen der Area F5 der Affen keine Bewegungs-, sondern regelrechte Aktionsneurone für erworbenes, zielgerichtetes Verhalten dar. Im weitesten Sinne könnte man sie auch Handlungsneurone nennen. Offenbar hält dieses Gehirngebiet einen Satz von Anweisungen für gängige Alltagssituationen bereit. Im Prinzip sollten diese Einzelprogramme auch zu beliebig variierten längeren Handlungsketten verknüpft werden können. Nach einer These des Hirnforschers William H. Calvin von der Universität des Staates Washington in Seattle leistet die Area F5 der Affen dergleichen allerdings nur relativ langsam, unpräzise und auch nur begrenzt.

Die Area F5 zeichnet eine weitere Eigenschaft aus, welche die Forscher zurzeit in Atem hält. Eine Klasse ihrer Zellen, als Spiegelneuronen bezeichnet, feuert sowohl, wenn der Affe eine bestimmte gelernte Handlung durchführt als auch, wenn er jemand anderen die gleiche Handlung ausführen sieht (siehe Bild S. 30). Dabei geht es gleichfalls immer um eine gezielte Aktion an einem Objekt, wie Zugreifen. Wichtig ist speziell, dass der Vorführende genau die gleiche Bewegung macht. Nimmt der Versuchsleiter die Rosine nicht mit den Fingern, sondern fasst sie mit einer Pinzette, bleiben jene Nervenzellen stumm.

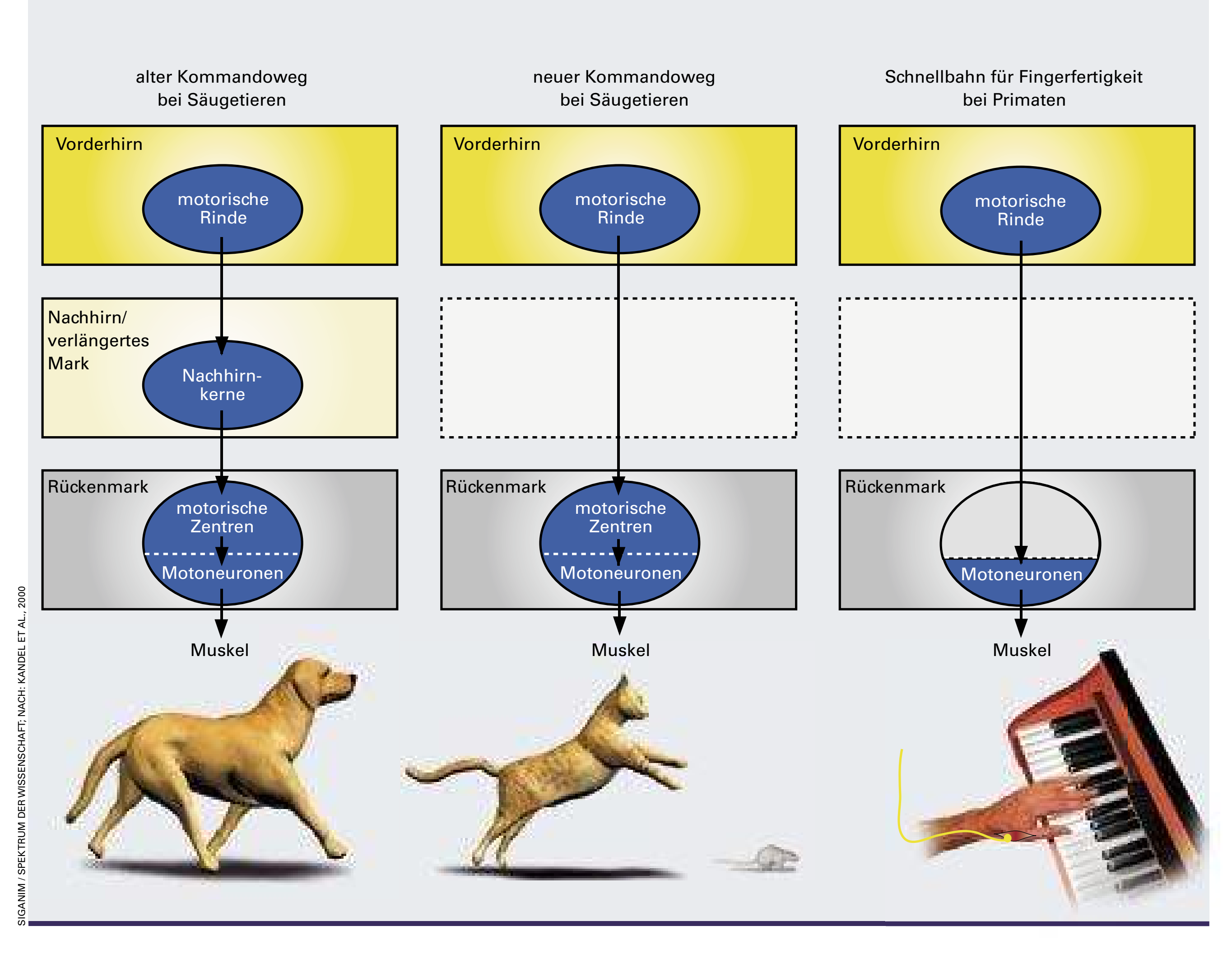
Handelt es sich hier um neuronale Algorithmen, die, verfeinert und erweitert, letztlich auch uns ermöglichen, komplexe Handlungsabläufe durch bloße Imitation zu erlernen – einschließlich des Sprechens? Nachahmendes Lernen ist für den Menschen wesentlich wichtiger als für jeden anderen Primaten. Ich erinnere mich noch gut daran, wie mir in meiner Werkstudentenzeit ein freundlicher Meister geduldig wieder und wieder vorführte, wie die Feile anzusetzen

GLOSSAR

- Bewegungsbefehle bei Säugern laufen von der **motorischen Rinde** (dem motorischen Kortex) im Vorderhirn entweder über Nachhirnkerne zum Rückenmark – oder, eine Neuerung bei Säugetieren, schneller über die **Pyramidenbahn** direkt zum Rückenmark.
- Die **prämotorischen Rindengebiete** liefern die Bewegungsprogramme und Handlungsabsichten. Zielgerichtete Hand- und Mundbewegungen generiert bei Affen die Area F5. Sie entspricht beim Menschen dem **Broca-Areal**, dem Sprechzentrum. Beiden übergeordnet ist das **SMA** (**supplementäre motorische Areal**), das unter anderem bei den Handlungsimpulsen und – beim Menschen – auch beim Sprechen mitwirkt.

Schnellstraße für motorisches Geschick

Die Pyramidenbahn der Säugetiere (mittlere und rechte Abfolge) übermittelt Handlungsimpulse vom Vorderhirn direkt zum Rückenmark. Bei den Primaten ziehen Fasern sogar gleich zu Motoneuronen. Das erlaubt isolierte Fingerbewegungen.



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: KANDEL ET AL., 2000

sei, damit eine glatte Fläche ohne Rillen entstand.

Noch wissen wir über Spiegelneuronen im Broca-Areal des Menschen nicht viel Genaues. Zumindest ist inzwischen aber deutlich, dass es dort solche Zellen gibt. Sie könnten bei unserem ausgeprägten Nachahmungstalent, worin besonders kleine Kinder geradezu Weltmeister sind, eine große Rolle spielen. Gut vorstellbar ist, dass speziell diese Hirnregion in der menschlichen Evolution hervorragende Voraussetzungen für eine ausgefeilte Feinmotorik bot. Möglicherweise bildeten die Handlungsneuronen das Fundament, um über die Pyramidenbahn präzis abgestimmte und selbst kleinste Bewegungen anzuweisen. Und die Spiegelneuronen halfen, komplizierte Bewegungsabläufe erst einmal zu erlernen.

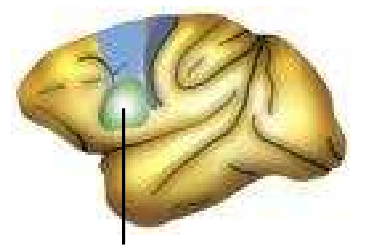
Defizite in diesem Hirngebiet sind, so vermuten einige Neuropsychologen neuerdings, vielleicht ein Grund, warum autistischen Kindern das Imitieren so auffallend schwer fällt. Viele von ihnen sprechen auch wenig, manche teilen sich sprachlich gar nicht mit. Und es gelingt ihnen oft nur unzureichend, Handlungen zu planen. Nach ersten Untersuchungen scheint das Broca-Areal bei Autisten weit weniger aktiv zu sein als normalerweise.

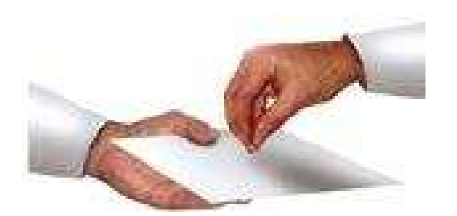
Sprache kommt vom Schauen

Die den Menschen auszeichnende Fähigkeit ist das Sprechen. Sprache erwerben wir durch Nachahmung. Es dürfte kein Zufall sein, dass unser Sprechzentrum, das Broca-Areal, sich offenbar aus der Area F5 der Affen entwickelt hat, in der für Anweisungen zu koordinierten Bewegungen auch visuelle Informationen verrechnet werden. Wie alle Primaten sind wir »Augentiere«. Das heißt, wir handeln weitgehend unter visueller Führung. Kinder lernen sprechen nicht nur durch Hören, sondern wesentlich auch, indem sie Mundbewegungen abschauen. Hierzu könnte passen, dass kleine Kinder eine Gebärdensprache genauso leicht erlernen wie eine akustische Sprache.

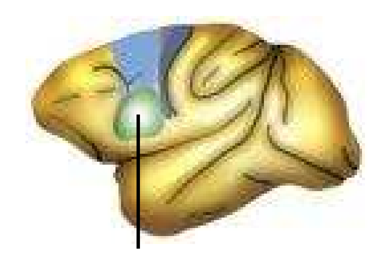
Man könnte sogar spekulieren, dem Verhalten der Spiegelneuronen ähnelnde Mechanismen wirken beim stillen, innerlichen Sprechen oder beim gedanklichen Planen mit. Denn schon bei Affen sind sie aktiv, wenn eine Handlung nur beobachtet, nicht ausgeführt wird. Es hat fast den Anschein, als würde das Tier die Tätigkeit dann allein im Geiste mitvollziehen. Dass beim Menschen die Motorik selbst beim reinen Denken zu- ▷

Affe greift Rosine



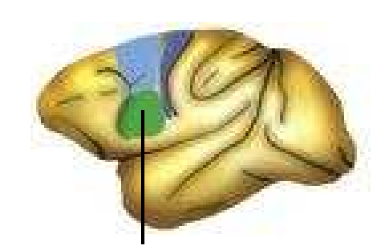


Affe sieht zu, wie ein Mensch die Rosine greift





Affe sieht zu, wie ein Mensch die Rosine mit einer Pinzette greift



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: GALLESE ET AL., 1996

Die Spiegelneuronen, lokalisiert in der Area F5 der Primaten, arbeiten bei Affen bei vorgestellten gerichteten Bewegungsabläufen. Diese Eigenschaft könnte zum ausgeprägten Nachahmungstalent des Menschen beigetragen haben.

geschaltet ist, zeigt sich auch darin, dass bei solcher Verstandesarbeit ausgedehnte Kleinhirngebiete aktiv sind. Früher hat man dem Kleinhirn nur motorische Funktionen zugeschrieben.

Das durchaus reichhaltige Lautrepertoire der Primaten erlernen Affenkinder nicht, es ist ihnen angeboren. Für diese angeborenen Laute ist die Area F5 der Affen nicht zuständig. Man sucht daher an falscher Stelle, wenn man die Ursprünge unseres Sprechens bei den Vokalisationen anderer Primaten vermutet. Möchte man bei Affen arteigene Laute auslösen, muss man ein anderes Hirnareal, den so genannten Gyrus cinguli reizen. Elektrische Reizung dieses Areals löst beim Menschen emotionale Laute wie Weinen oder Lachen aus, niemals aber Sprachelemente. Dagegen ruft eine Stimulation im prämotorischen Gebiet beim Menschen das Sprechen von Silben und Wörtern hervor, bei Primaten aber keine Lautäußerung.

Für die angeborenen Vokalisationen von Affen ist die Hirnrinde im Prinzip verzichtbar. Das arteigene Lautrepertoire und auch die Fähigkeit zur Vokalisation bleiben erhalten, wenn diese Rindengebiete lädiert sind. Das steht völlig im Gegensatz zum Sprechen des Menschen: Patienten mit beidseitigen Läsionen des motorischen Gesichtskortex können nicht mehr sprechen und auch nicht mehr singen.

Affen verfügen nur über angeborene Laute. Deren neuronaler Ursprung ist zwar nicht bekannt. Es wurden jedoch mehrere Hirngebiete identifiziert, deren elektrische Reizung solche Laute hervorruft. Ein Tor für das gesamte Repertoire befindet sich im Mittelhirn. Wie oben erwähnt, lassen sich die meisten arteigenen Vokalisationen im Gyrus cinguli auslösen. Er liegt in der Hirnrinde weit innen etwa dort, wo die beiden Großhirnhemisphären zusammenstoßen.

Alte Zentren neu vereinnahmt

Man weiß noch wenig darüber, in welchem Ausmaß der Gyrus cinguli bei uns eine lautgebende Funktion hat. An emotional gefärbten Lauten scheint er beteiligt zu sein. Für Sprachelemente ist er aber bedeutungslos. Somit sind die alten Vokalisationszentren der Primaten für unser Sprechen nicht maßgeblich und waren es offenbar nie.

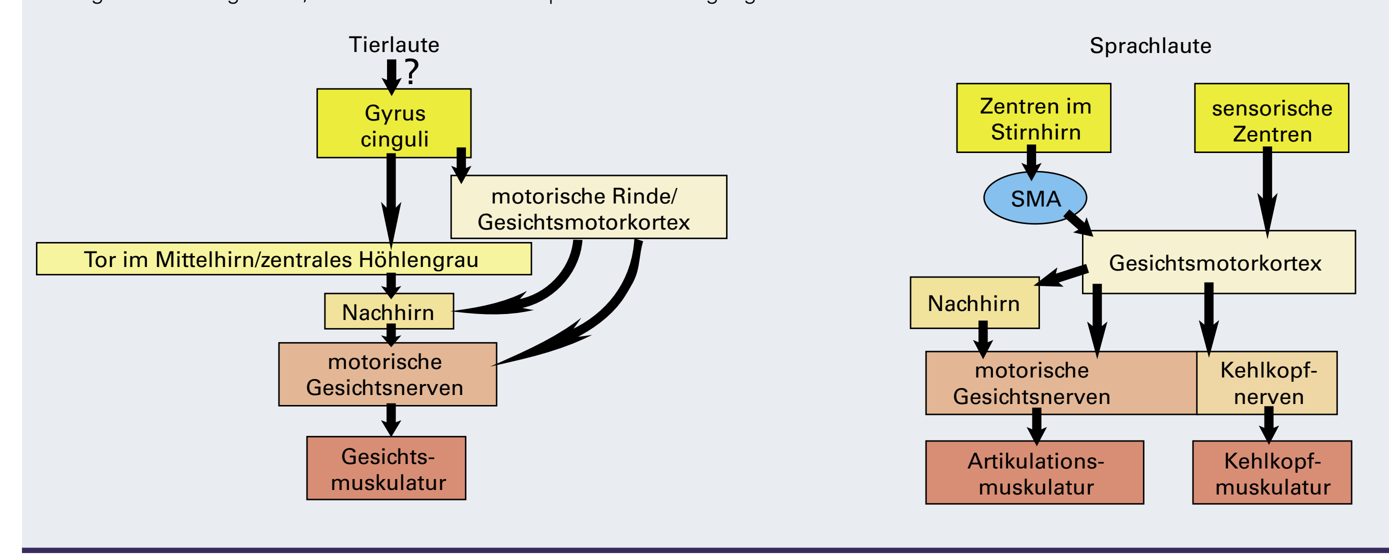
Umso wichtiger sind dafür motorische und prämotorische Rindengebiete, welche die Programme für Aktionen liefern und die Gesichts- und gesamte Artikulationsmuskulatur kontrollieren. Impulse zum Sprechen entstehen noch an anderer Stelle, nämlich in einem großflächigen Rindenfeld sozusagen oben auf dem Scheitel neben oder besser über dem Broca-Areal – dem eigentlichen Sprechzentrum (siehe Bild S. 27). Dieses Feld, das supplementäre – ergänzende – Motorareal (SMA), nimmt schon in der Willkürmotorik von Tieren einen hohen Rang ein und wird oft dem prämotorischen Kortex zugerechnet. Es trägt einen Großteil der Fasern der Pyramidenbahn bei, auch von solchen, die zum Gesicht ziehen. Das SMA ist generell für die Programmerstellung von absichtsvollen Aktionsmustern wichtig, also für die Vorbereitung und Ausführung von Handlungen.

Wird dieses Rindenfeld bei Menschen elektrisch gereizt, äußert der Betreffende einzelne Sprachelemente und Silben. Dennoch ist das SMA beim Menschen nicht der zentrale Sitz der Sprache. Erst das Zusammenspiel zwischen SMA und Broca-Areal generiert Wörter und Sätze, fügt also die Elemente zu einem Ganzen zusammen.

Das SMA scheint für das spontane Sprechen bedeutsam zu sein. Ist dieses Areal zerstört, kann der Patient zwar noch auf Fragen antworten, nicht aber spontan reden, keine Gedanken mehr äußern. Es fehlt sozusagen der Impuls zu sprechen. Für unser Verständnis der SMA-Funktion hilft weiter, dass dieses Feld bei Affen – und beim Menschen – erinnerte Handbewegungen initiiert. Beim Menschen könnte das Feld eine

Wie Sprechen zu Stande kommt

Für die angeborenen Lautäußerungen von Affen (links) arbeiten völlig andere Hirngebiete, als wenn der Mensch spricht. Unsere Sprache (rechts) kommt von Orten, über die Primaten Bewegungen aufrufen.



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: JÜRGENS, 2002

Doppelfunktion haben: Es holt gelernte Fingerfertigkeit wie auch Sprechbewegungen aus dem Gedächtnis. Wie die beiden Hirnareale, SMA und Broca-Areal, zusammenarbeiten und welche Teilfunktionen jedem der beiden zukommen, ist noch unklar.

Denken entstand aus Bewegung

Weil diesen beiden Gebieten beim Menschen eine Doppelrolle zukommt – Steuerung von Handlungen im wörtlichen Sinne und das Sprechen –, sind einige Hirnforscher heute überzeugt, dass die Sprache sich aus der zunehmenden manuellen Geschicklichkeit der Primaten entwickelte, was die sich rasch differenzierende Mimik einschließt. Anscheinend besitzen Affen in ihrer Area F5, dem Vorläufer des Broca-Areals, neuronale Algorithmen, die Einzelbewegungen verknüpfen. Nur bleiben die resultierenden Ketten überschaubar kurz. Es fehlt den Affen offensichtlich die Möglichkeit, komplexe Bewegungen zeitlich präzise zu längeren Handlungsketten zusammenzufügen und zu erinnern.

Diese Fähigkeit ist allerdings nicht nur nötig, um Klavier spielen zu können, sondern um Silben zu Wörtern und Wörter zu prinzipiell endlosen Folgen von Sätzen zusammenzufügen. Offenbar verfügt einzig der Mensch in den am Sprechen beteiligten Hirnzentren, vielleicht im Broca-Areal, über lokale Nervennetze, die diese im Prinzip endlose Verkettung von Bewegungsabläufen ermöglichen. Sie sind die Voraussetzung für das Sprechen.

Nimmt man all das zusammen, scheint das Sprechen evolutionsgeschichtlich eng mit unserer manuellen Geschicklichkeit verwandt zu sein. Selbst die höchsten Leistungen in Kunst und Wissenschaft gäbe es nicht ohne diese Fähigkeiten. Wir wüssten nichts vom Gedankenreichtum eines Charles Darwin oder von den musikalischen Ideen eines György Ligeti, hätten sie ihre Vorstellungen nicht ausgesprochen oder niedergeschrieben, ob nun in Wort- oder Notenschrift. Hören oder lesen wir die wissenschaftlichen oder musikalischen Gedanken anderer, können wir sie sogar nachvollziehen.

Die Sprachzentren im Vorderhirn, allen voran das Broca-Areal, vermögen – ganz anders als das Pendant der Affen – Handlungselemente vor allem der Artikulationsmuskulatur schnell und sehr präzise zu prinzipiell beliebig langen Ketten zu verbinden. Dazu verfügen sie über neuronale Algorithmen, welche die einzelnen motorischen Anweisungen in beliebiger, immer wieder anderer Reihenfolge zusammenknüpfen. Die Verkettung kann gelernten Regeln folgen, sei es eine Grammatik oder beim Klavierspielen ein Fingersatz.

Woher allerdings die Strukturen einer Grammatik kommen, die Wörter in eine Satzlogik einordnen, wissen wir (noch) nicht. Die biologische Forschung stößt hier an ihre Grenze. Zur Erzeugung von Ketten sprachlicher Laute, die bedeutungstragend sind, bedarf es phonologischer und syntaktischer Kompetenzen, wie sie Noam Chomsky herausgearbeitet hat. Wie sich diese Kompetenzen im Zusammenspiel mit den motorischen Fähigkeiten entwickelt haben, ist heute noch nicht beantwortbar.

Oft führen wir unsere motorischen Gedanken nicht einmal aus, sondern erleben sie stumm. Dann überlegen oder planen wir im Geiste. Unsere Denkkraft erwuchs aus der herausragenden motorischen Intelligenz, mit der wir unsere Hände gebrauchen und die Sprache meistern. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gerhard Neuweiler ist Neurobiologe. Er hatte an der Ludwig-Maximilians-Universität München bis 2003 eine Professur für Zoologie und vergleichende Anatomie. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Neurobiologie von Fledermäusen und die Evolution des Gehirns der Säugetiere und des Menschen.

Die Entstehung von Intelligenz. Von William H. Calvin in: Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3: Leben und Kosmos, 1994, S. 70

Neural pathways underlying vocal control. Von Uwe Jürgens in: Neuroscience and Biobehavioral Review, Bd. 26, 2002, S. 235

The evolution of speech: a comparative review. Von W. Tecumseh Fitch in: Trends in Cognitive Sciences, Bd. 4, 2000, S. 258

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

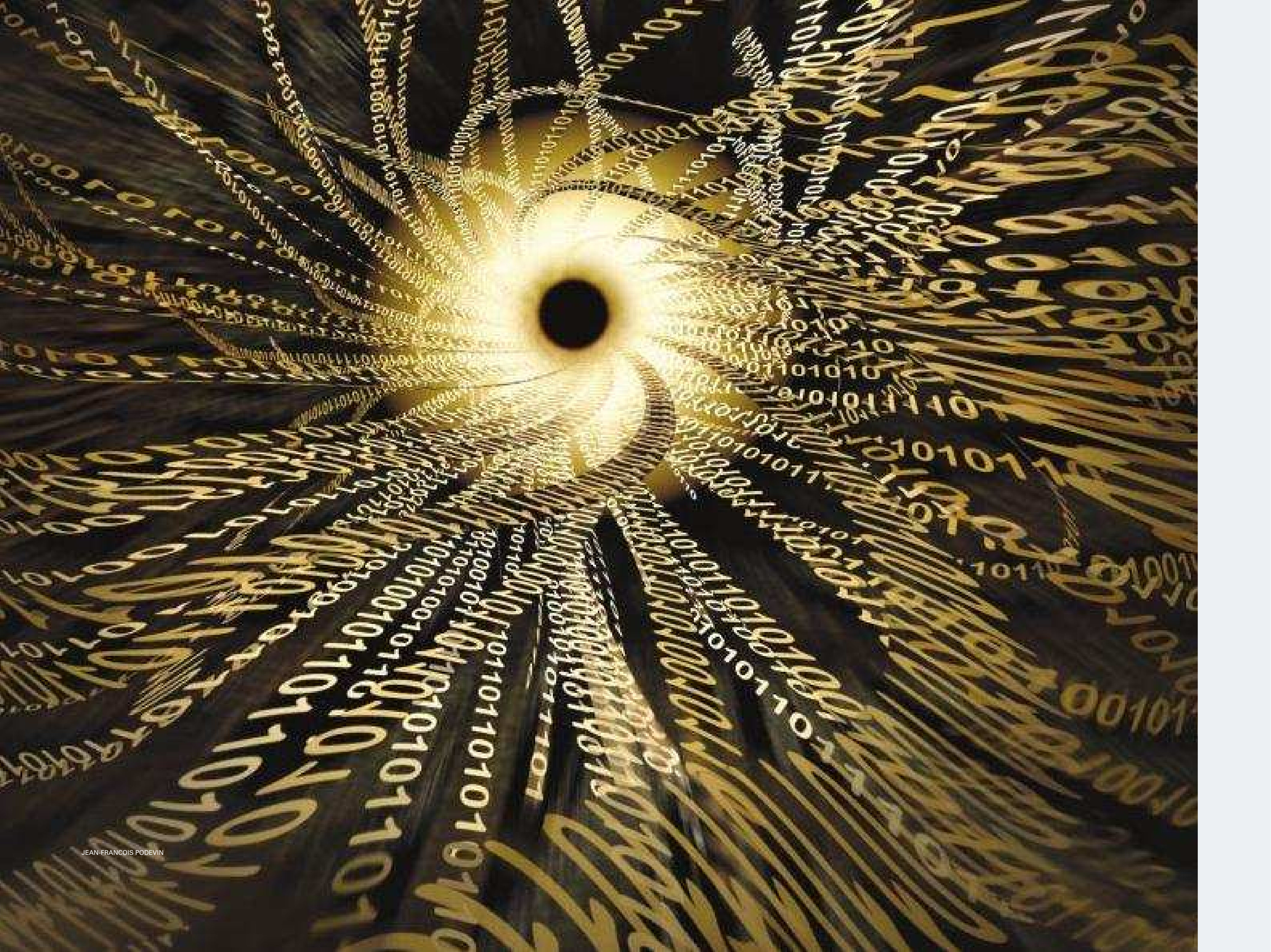
Ist das Universum ein Computer?

Werden physikalische Gesetze als Rechenanweisungen für die Natur betrachtet, so verhält sich das Universum wie ein gigantischer Computer. Die Frage ist nur, ob Schwarze Löcher dieses grandiose Bild nicht empfindlich stören.

Von Seth Lloyd und Y. Jack Ng

Was ist der Unterschied zwischen einem Computer und einem Schwarzen Loch? Das hört sich an wie eine Scherzfrage für geplagte Programmierer, doch tatsächlich steckt dahinter ein grundlegendes Problem der modernen Physik. Die meisten Leute denken bei Computern an hoch spezialisierte Geräte: durchgestylte Kästen auf dem Schreibtisch oder fingernagelgroße Chips in Espressomaschinen. Aber für einen Physiker ist jedes physikalische System ein Computer. Felsbrocken, Atombomben und Galaxien laufen zwar nicht unter Windows oder Linux, aber auch sie speichern und verarbeiten Information. Jedes Elektron, Photon oder sonstige Elementarteilchen speichert Datenbits – und jedes Mal, wenn zwei solche Partikel in Wechselwirkung treten, werden diese Bits umgewandelt. Physikalisches Sein und Informationsgehalt sind untrennbar verbunden. Das meint der Physiker John Wheeler von der Princeton-Universität mit dem Slogan »It from bit«: Es (kommt) vom Bit.

Schwarze Löcher scheinen die große Ausnahme von dieser Regel zu sein. Zwar lassen sie sich bereitwillig mit Information füttern, aber gemäß Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie geben sie die Daten nie wieder preis. ▷



JEAN-FRANCOIS PODEVIN

▷ ein Schwarzes Loch stürzende Materie wird verschlungen, die Details ihrer Zusammensetzung gehen unwiederbringlich verloren. Allerdings zeigte Stephen Hawking von der Universität Cambridge in den 1970er Jahren, dass Schwarze Löcher, quantenmechanisch betrachtet, dennoch einen Output haben: Sie geben eine schwache Strahlung ab. Nach Hawkings Analyse ist dieser Output jedoch zufallsverteilt; er enthält keinerlei Information über den Input. Wenn ein Elefant in ein Schwarzes Loche fiele, käme letzten Endes die ihm entsprechende Energiemenge wieder heraus – aber als ein Mischmasch, aus dem sich der Dickhäuter prinzipiell nicht rekonstruieren ließe.

Dieser vermeintliche Datenverlust wirft ein ernstes Problem auf, denn gemäß den Gesetzen der Quantenmechanik bleibt Information erhalten. Forscher wie Leonard Susskind von der Stanford-Universität (Kalifornien), John Preskill vom California Institute of Technology und Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht (Holland) sind darum überzeugt, dass die Hawking-Strahlung nicht zufallsverteilt ist, sondern die ins Loch gestürzte Materie in verarbeiteter Form wiedergibt (siehe »Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern« von Leonard Susskind, Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58). Im vergangenen Sommer schloss sich Hawking dieser Meinung an. Auch Schwarze Löcher sind Computer (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 19).

Somit bieten Schwarze Löcher nur das exotischste Beispiel eines allgemeinen Prinzips: Das Universum speichert und verarbeitet Information. Dieses Prinzip selbst ist nicht neu. Im 19. Jahrhundert formulierten die Begründer der Statistischen Mechanik die Gesetze der Thermodynamik, die später in die Informationstheorie einflossen. Auf den ersten Blick scheinen Thermodynamik und Informationstheorie wenig gemein zu haben: Die eine widmet sich der Physik von Dampfmaschinen, die andere dient der Optimierung von Kommunikation. Doch die Entropie – ein thermodynamischer Begriff, der gewisse Leistungsgrenzen von Dampfmaschinen beschreibt – ist zugleich proportional zur Zahl der Bits, die durch Ort und Geschwindigkeit der Teilchen in einer Substanz repräsentiert werden. Die Einführung der Quantenmechanik zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellte diese Entdeckung nicht nur auf ein solides quantitatives Fundament, sondern eröffnete den Zugang zum bahnbrechenden Konzept der Quanteninformation: Die Bits, aus denen das Universum besteht, sind Quanten-Bits – kurz »Qubits« –, die sehr viel mehr Information enthalten als gewöhnliche Bits.

Auch die Natur ist diskret

Die Beschreibung des Universums mittels Bits und Bytes ersetzt zwar nicht die herkömmliche Analyse mittels Kraft und Energie, aber sie enthüllt neue und überraschende Zusammenhänge. In der Statistischen Mechanik etwa half sie, das Paradoxon des Maxwell'schen Dämons aufzulösen – einer Vorrichtung, die scheinbar ein Perpetuum mobile ermöglicht. In den letzten Jahren haben wir und andere Physiker diese Erkenntnisse auch auf Kosmologie und Grundlagenphysik angewandt: auf Schwarze Löcher, die Feinstruktur der Raumzeit und die kosmische Dunkle Energie. Das Universum ist demnach nicht nur ein gigantischer Computer, sondern ein einziger Quantencomputer. Mit den Worten der Physikerin Paola Zizzi von der Universität Padua: Es kommt vom Qubit.

Das Zusammenspiel von Physik und Informationstheorie beruht auf einem zentralen Axiom der Quantenmechanik: Im Grunde verhält sich die Natur nicht kontinuierlich, sondern diskret. Ein physikalisches System lässt sich durch eine endliche Anzahl von Bits beschreiben. Jedes Teilchen des Systems agiert wie ein logisches Schaltelement in einem Computer: Der Teilchenspin kann in eine von zwei möglichen Richtungen zeigen und damit ein Bit repräsentieren; er kann die Orientierung wechseln und damit eine einfache Rechenoperation ausführen.

Auch zeitlich betrachtet entwickelt sich das System nicht kontinuierlich, sondern diskret. Um ein Bit umzuschalten, ist ein Minimum an Zeit nötig. Der genaue Betrag folgt aus einem Theorem, das Norman Margolus vom Massachusetts Institute of Technology und Lev Levitin von der Universität Boston formulierten. Es ist verwandt mit der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation, die der gleichzeitigen Messung von Ort und Impuls oder von Zeit und Energie prinzipielle quantenmechanische Grenzen setzt. Dem Margolus-Levitin-Theorem zufolge ist die zum Umschalten eines Bits erforderliche Zeit t umgekehrt proportional zur dafür aufgewandten Energie E. Je mehr Energie man anwendet, desto schneller springt das Bit um. Die Formel dafür lautet $t \geq h/4E$, wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum bezeichnet, die wichtigste Konstante der Quantentheorie. Zum Beispiel speichert ein experimentell realisierter Quantencomputer-Prototyp Bits auf Protonen und verwendet Magnetfelder, um sie umzuschalten. Diese Operationen finden in der kürzesten Zeit statt, die das Margolus-Levitin-Theorem zulässt.

Das Theorem erlaubt zahlreiche Schlussfolgerungen. Sie reichen von Einschränkungen für die Geometrie der Raumzeit bis zur Rechenleistung des gesamten Universums. Als kleine Vorübung wollen wir die Grenzen der Rechenleistung an einem Stück gewöhnlicher Materie studieren – einer Masse von einem Kilogramm in einem Volumen von einem Liter. Wir nennen unser Gerät den ultimativen Laptop (Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 24).

Als Batterie dient einfach die Masse selbst, die nach Einsteins berühmter For- ▷

IN KÜRZE

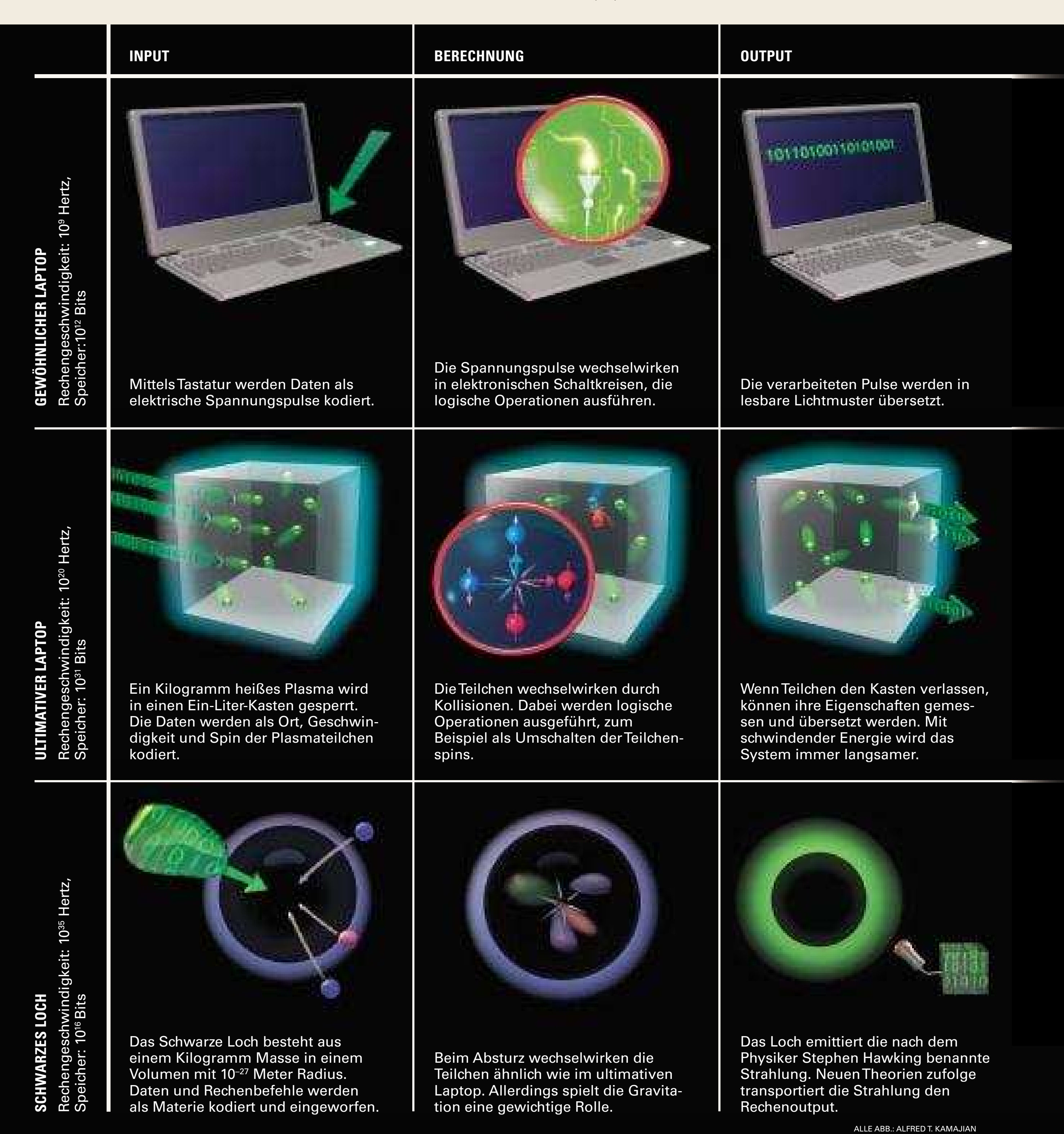
▶ **Das Universum rechnet:** Schon durch ihre bloße Existenz speichern alle physikalischen Systeme Information. Indem sie sich mit der Zeit dynamisch verändern, verarbeiten sie diese Daten.

▶ Wenn **Information aus einem Schwarzen Loch** entkommen kann – wie die meisten Physiker heute annehmen –, dann verhalten sich auch Schwarze Löcher wie Rechenmaschinen. Grundlage dafür ist die Quantenmechanik; ohne Quanteneffekte würde ein Schwarzes Loch Information unwiederbringlich vernichten.

▶ Die physikalischen Gesetze begrenzen die Rechenleistung von Computern sowie die Genauigkeit, mit der die **Geometrie der Raumzeit** gemessen werden kann. Diese Messgenauigkeit ist niedriger, als die Physiker früher vermuteten. Demnach könnten die diskreten »Atome« von Raum und Zeit unerwartet groß sein.

Extreme Rechenmaschinen

Was ist ein Computer? Die Antwort erweist sich als überraschend kompliziert. Der Begriff umfasst nicht nur elektronische Rechenmaschinen, sondern auch alles andere in der Welt. Physikalische Objekte können eine Vielzahl logischer und mathematischer Probleme lösen, selbst wenn sie keinen erkennbaren Input aufnehmen oder keinen Output liefern, der für Menschen Sinn ergibt. Natürliche Computer sind von selbst digital: Sie speichern Daten in Form diskreter Quantenzustände, etwa als Spin von Elementarteilchen. Die Rechenbefehle liefert die Quantenphysik.



ALLE ABB.: ALFRED T. KAMAJIAN

▷ mel $E = mc^2$ direkt in Energie umgewandelt wird. Nutzt man die gesamte Energie zum Bit-Umschalten, vermag der Computer 10^{51} Operationen pro Sekunde auszuführen – wobei das Tempo mit schwindender Energie allmählich nachlässt. Die Speicherkapazität dieses Rechners lässt sich mit Hilfe der Thermodynamik errechnen. Wenn ein Kilogramm Materie in einem Volumen von einem Liter komplett in Energie umgewandelt wird, entsteht eine Temperatur von einer Milliarde Kelvin. Die Entropie – sie ist proportional zum Quotienten aus Energie und Temperatur – beträgt dann 10^{31} Informationsbits. Der ultimative Laptop speichert die Information in den winzigen Orten und Bewegungen der in ihm umherschwirrenden Elementarteilchen. Jedes einzelne Bit, das nach den Gesetzen der Thermodynamik nutzbar ist, wird zur Rechenarbeit herangezogen.

Bei jeder Wechselwirkung können die Teilchen einander umschalten. Diesen Prozess kann man sich analog zu einer Programmiersprache wie C oder Java vorstellen: Die Teilchen sind die Variablen und ihre Wechselwirkungen sind Rechenschritte, beispielsweise eine Addition. Jedes Bit kann 10^{20} Mal pro Sekunde umspringen; das entspricht einer Taktfrequenz von 100 Giga-Gigahertz. Tatsächlich ist dieses System viel zu schnell, als dass es sich von einem zentralen Taktgeber steuern ließe. Die Zeit, die ein Bit zum Umschalten braucht, ist annähernd so groß wie die Zeit, die ein Signal von einem Bit zu seinem Nachbarn benötigt. Daher arbeitet der ultimative Laptop hochgradig parallel: Er funktioniert nicht als einzelner Prozessor, sondern wie ein riesiges System von Prozessoren, die alle fast unabhängig voneinander arbeiten und ihre Ergebnisse vergleichsweise langsam den anderen mitteilen.

Hingegen enthält ein herkömmlicher Computer nur einen einzigen Prozessor, schaltet seine Bits etwa 10^9 Mal pro Sekunde um und speichert rund 10^{12} Bits. Würde das Moore'sche Gesetz – wonach sich die Computerleistung im Schnitt alle anderthalb Jahre verdoppelt – bis in die fernere Zukunft gelten, so könnten unsere Nachfahren etwa Mitte des 23. Jahrhunderts einen ultimativen Laptop kaufen. Dazu müssten Ingenieure freilich Mittel und Wege finden, alle Teilchenvorgänge in einem Plasma, das heißer ist als der Kern unserer Sonne, präzise zu kontrollieren. Ein Großteil des internen Datenverkehrs würde für Computersteuerung und Fehlerkorrektur aufgebraucht. Außerdem wären heikle Verpackungsprobleme zu lösen.

Doch in gewissem Sinne kann man ein solches Gerät schon heute erwerben, wenn man die richtigen Leute kennt. Ein komplett in Energie umgewandeltes Kilogramm Materie entspricht einer frisch gezündeten 20-Megatonnen-Wasserstoffbombe. Eine explodierende Nuklearwaffe verarbeitet eine riesige Informationsmenge; dabei ist der Input durch den Anfangszustand gegeben und der Output durch die emittierte Strahlung.

Wenn jedes Stück Materie ein Computer ist, dann entspricht ein Schwarzes Loch einfach einem Rechengerät, das auf absolute Minimalgröße komprimiert wurde. Während ein Computer schrumpft, wird die Schwerkraft, die seine Komponenten aufeinander ausüben, immer stärker, bis ihr schließlich kein materielles Objekt mehr zu widerstehen vermag. Die Größe eines Schwarzen Lochs – der so genannte Schwarzschild-Radius – ist direkt proportional zu seiner Masse.

Ein Schwarzes Loch mit einem Kilogramm Masse hat einen Radius von ungefähr 10^{-27} Metern; ein Proton ist mit 10^{-15} Meter Radius vergleichsweise riesig. Da sich der Energiegehalt des Computers durch Schrumpfen nicht ändert, kann er wie zuvor 10^{51} Operationen pro Sekunde ausführen. Anders steht es um die Speicherkapazität. Solange die Schwerkraft keine Rolle spielt, ist die Speichergröße proportional zur Gesamtzahl der Teilchen und somit zum Volumen. Aber wenn die Gravitation dominiert, verbindet sie die Teilchen miteinander, sodass diese zusammen weniger Information zu speichern vermögen. Die gesamte Speicherkapazität eines Schwarzen Lochs ist proportional zur Größe seiner Oberfläche. In den 1970er Jahren haben Hawking und Jacob Bekenstein von der Hebräischen Universität Jerusalem berechnet, dass ein Ein-Kilogramm-Loch rund 10^{16} Bits speichern kann – viel weniger als derselbe Computer vor seiner Kompression.

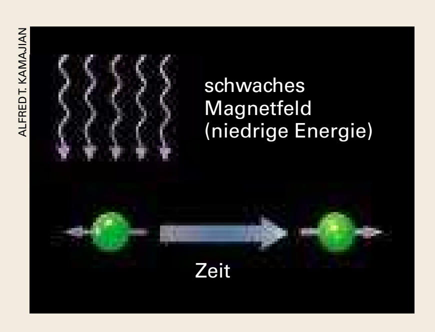
Schwarze Löcher als kompakte Rechner

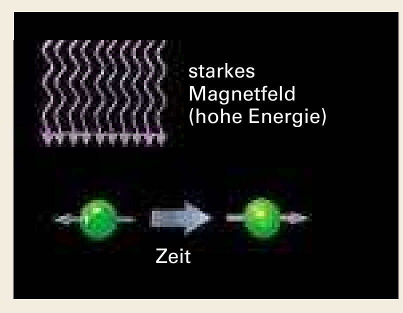
Dafür ist das Schwarze Loch ein viel schnellerer Rechner: Die für das Umschalten eines Bits nötige Zeit beträgt 10^{-35} Sekunden – genauso viel Zeit, wie Licht braucht, um von einem Ende des Computers zum anderen zu gelangen. Deshalb ist das Schwarze Loch – im Gegensatz zum hochgradig parallel arbeitenden ultimativen Laptop – ein serieller Computer. Das Schwarze Loch verhält sich als eine Gesamtheit.

Wie würde so ein Computer praktisch funktionieren? Der Input ist kein Problem: Man kodiert die Daten einfach in Form von Materie oder Energie und wirft sie ins Loch. Durch geschicktes Präparieren des eingespeisten Materials lässt sich das Schwarze Loch so programmieren, dass es jede beliebige Rechenaufgabe zu lösen vermag. Wenn das Material einmal den so genannten Ereignishorizont passiert hat, gibt es kein Zurück mehr. Die hineinstürzenden Teilchen wechselwirken miteinander und können eine begrenzte Zeit lang Rechenoperationen ausführen, bis sie im Zentrum des Schwarzen Lochs – der Singularität – aufhören zu existieren. Was mit der Ma-

Computer-Grundgesetz

ALFRED T. KAMAJIAN





Die erste Regel für Quantencomputer besagt, dass Berechnungen Energie verbrauchen. Der Spin eines Protons kodiert ein einzelnes Bit und kann durch Anlegen eines Magnetfelds umgekehrt werden. Je stärker das Feld – je mehr Energie es ausübt –, desto schneller schaltet das Proton.

terie geschieht, wenn sie in der Singularität zerquetscht wird, hängt von bislang unbekannten Details der Quantengravitation ab.

Der Output erfolgt in Form der Hawking-Strahlung. Das Ein-Kilogramm-Loch verliert dabei aus Gründen der Energieerhaltung an Masse und ist nach nur 10^{-21} Sekunden völlig verschwunden. Der größte Teil der Strahlung hat eine Wellenlänge, die dem Radius des Schwarzen Lochs entspricht; in unserem Fall emittiert das winzige Loch extrem intensive Gammastrahlung. Ein Teilchendetektor kann diese Strahlung einfangen und dekodieren.

Hawkings theoretische Entdeckung der nach ihm benannten Strahlung beseitigte das verbreitete Missverständnis, von Schwarzen Löchern könne gar nichts ausgehen. Die Emissionsrate Schwarzer Löcher ist allerdings umgekehrt proportional zu ihrer Größe. Deshalb verlieren große Schwarze Löcher – wie die im Zentrum von Galaxien – sehr viel langsamer Energie, als sie Materie verschlingen. Doch vielleicht wird es künftig möglich sein, in Teilchenbeschleunigern winzige Schwarze Löcher zu erzeugen, die dann fast augenblicklich mit einem Strahlungsausbruch explodieren würden. Insofern sollte man sich unter einem Schwarzes Loch kein fertiges Objekt vorstellen, sondern eine vorübergehende Materieansammlung, die mit größtmöglicher Geschwindigkeit Berechnungen durchführt.

Die entscheidende Frage ist, ob die Hawking-Strahlung das Ergebnis der Berechnung wiedergibt oder bloß statistisches Rauschen. Dieses Problem bleibt umstritten, doch inzwischen meinen die meisten Physiker – auch Hawking –, dass die Strahlung tatsächlich eine gründlich verarbeitete Version der bei Entstehung des Schwarzen Lochs eingeflossenen Information darstellt. Zwar kann Materie dem Loch nicht entfliehen, wohl aber ihr Informationsgehalt. Über das Wie wird derzeit lebhaft debattiert.

Kürzlich skizzierten Gary Horowitz von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und Juan Maldacena vom Institute for Advanced Study in Princeton einen möglichen Mechanismus. Als rettenden Ausweg nutzten die Forscher die so genannte Verschränkung – ein Quantenphänomen, bei dem die Eigenschaften von zwei oder mehr Systemen auch über makroskopische Raum- und Zeitstrecken korreliert bleiben. Auf Verschränkung beruht wiederum die so genannte Teleportation: Die Information über ein Teilchen wird so exakt und vollständig auf ein anderes übertragen, als wäre das eine Teilchen praktisch mit nahezu Lichtgeschwindigkeit zum Ort des anderen »gebeamt« worden.

Teleportation im Labor

Teleportation wurde im Labor bereits demonstriert. Zunächst müssen zwei verschränkte Partikel erzeugt werden. Dann wird an einem der beiden Teilchen eine Messung vorgenommen, und zwar zusammen mit dem Objekt, dessen Information teleportiert werden soll. Die Messung löscht die Information am ursprünglichen Ort, doch wegen der Verschränkung bleibt die Information im zweiten Teilchen in kodierter Form erhalten – gleichgültig, wie weit es sich unterdessen entfernt hat. Schließlich kann die Information am Ort des zweiten Teilchens dekodiert werden, wobei die Resultate der Messung als Schlüssel dienen (siehe »Quanten-Teleportation« von Anton Zeilinger, Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 30).

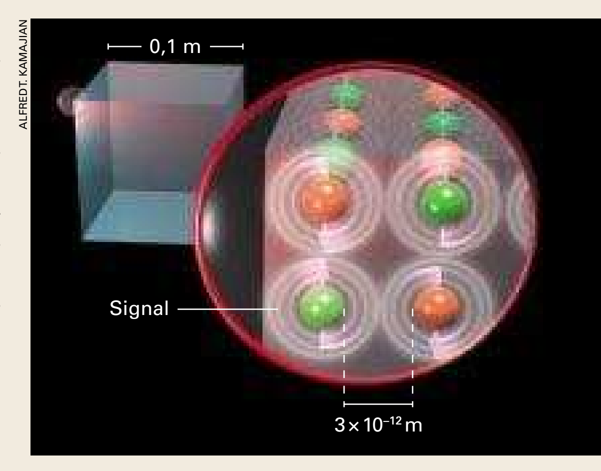
Ähnlich könnte es bei Schwarzen Löchern funktionieren. Am Ereignishorizont entstehen Paare verschränkter Photonen. Eines entkommt nach außen und kann als Hawking-Strahlung beobachtet werden. Das zweite stürzt nach innen und trifft die Singularität sowie die Materie, aus der das Schwarze Loch ur- ▷

Extreme Rechner im Vergleich

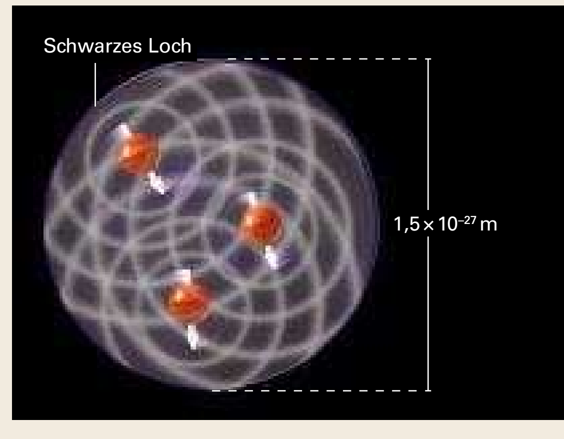
Der ultimative Laptop und der Schwarzes-Loch-Computer verkörpern zwei unterschiedliche Wege zur Maximierung der Rechenleistung. Der ultimative Laptop ist der optimale Parallelcomputer, in dem zahlreiche Prozessoren simultan arbeiten. Das Schwarze Loch ist der optimale serielle Computer, bei dem ein einzelner Prozessor Rechenbefehle sukzessive abarbeitet.

Die ultimative Laptop besteht aus einer Ansammlung von Teilchen, die Bits kodieren und verarbeiten. Jedes Teilchen vermag in 10^{-20} Sekunden einen Befehl auszuführen. In dieser Zeitspanne können sich Signale nur 3×10^{-12} Meter weit fortpflanzen; das entspricht ungefähr dem Abstand zwischen den Teilchen. Deshalb ist die Kommunikation viel langsamer als die Berechnung. Teilregionen des Computers arbeiten fast unabhängig voneinander.

ALFREDT. KAMAJIAN



Auch der Schwarzes-Loch-Computer besteht aus einer Teilchenansammlung. Wegen der enorm starken Schwerkraft kodieren die Teilchen weniger Bits, wodurch pro Bit mehr Energie zur Verfügung steht. Jedes Teilchen vermag in 10^{-35} Sekunden einen Befehl auszuführen. In dieser Zeit kann ein Signal das Schwarze Loch durchqueren. Daher sind Kommunikation und Berechnung etwa gleich schnell. Der Computer arbeitet als eine Gesamtheit.



▷ sprünglich entstanden ist. Die Vernichtung des einfallenden Photons entspricht einer Messung und überträgt die in der Materie enthaltene Information auf die emittierte Hawking-Strahlung.

Der Unterschied zur Teleportation im Labor ist, dass die Ergebnisse dieser »Messung« nicht benötigt werden, um die teleportierte Information zu dekodieren. Horowitz und Maldacena zufolge hat die Vernichtung nicht eine Vielzahl möglicher Resultate, sondern nur ein einziges. Ein außen stehender Beobachter kann dieses Endergebnis mit Hilfe einfacher physikalischer Methoden berechnen und auf diese Weise die Information entschlüsseln.

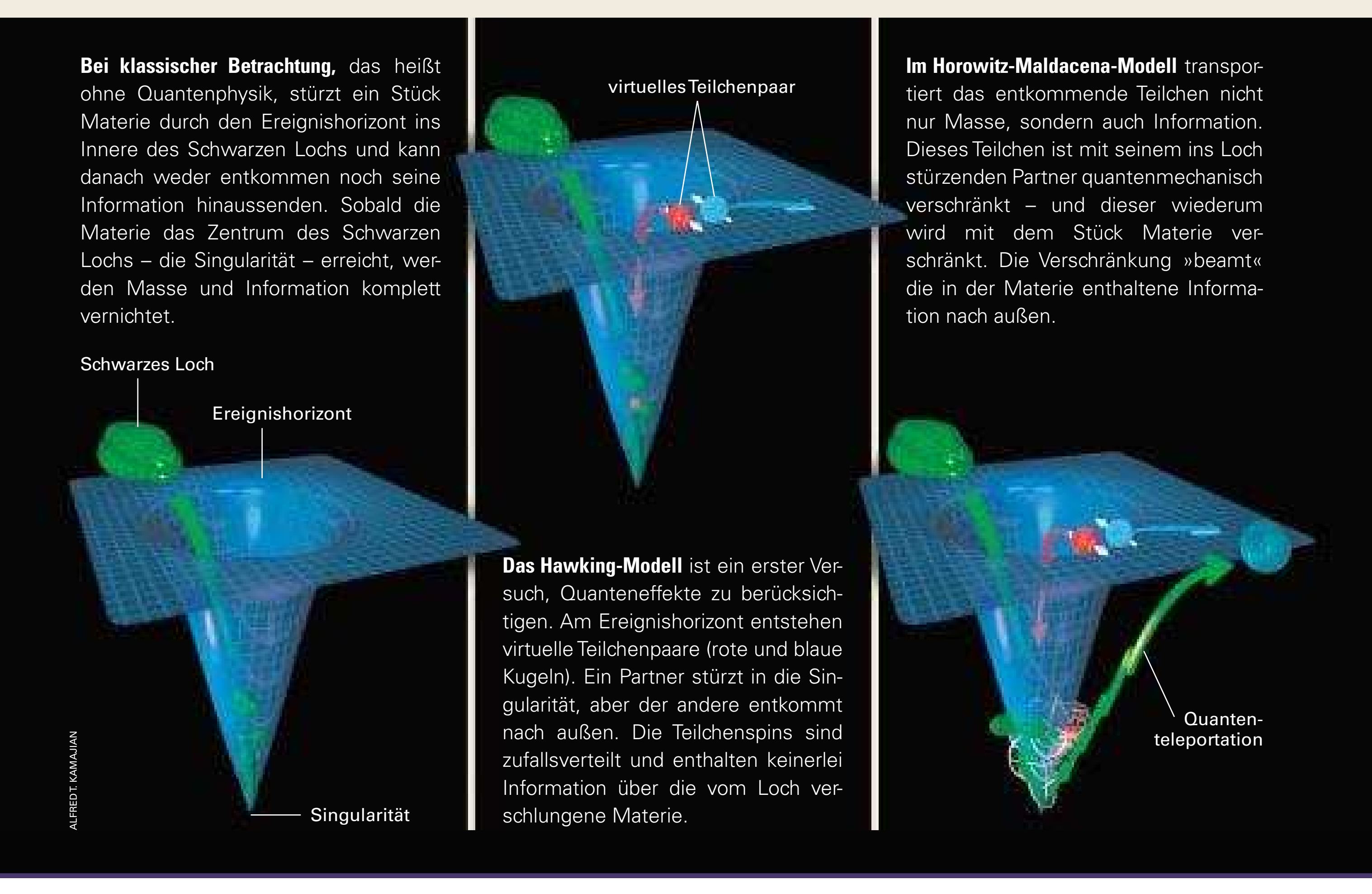
Diese Vermutung fällt aus dem Rahmen der üblichen Quantenmechanik und ist umstritten, wenngleich plausibel. So wie die Anfangssingularität unseres Universums vermutlich nur einen möglichen Zustand hatte, könnten auch die endgültigen Singularitäten im Innern Schwarzer Löcher einem eindeutigen Zustand entsprechen. Im Juni 2004 zeigte einer von uns (Lloyd), dass der Horowitz-Maldacena-Mechanismus tatsächlich nicht von den Details des Endzustands abhängt – solange es überhaupt einen gibt. Allerdings scheint doch ein wenig Information verloren zu gehen.

Die Quantenbits der Raumzeit

Auch andere Hypothesen zur Informationserhaltung beruhen auf exotischen Quantenphänomenen. 1996 schlugen Andrew Strominger und Cumrun Vafa von der Harvard-Universität vor, Schwarze Löcher als zusammengesetzte Körper zu betrachten, die aus »Branen« bestehen; diese vieldimensionalen Strukturen treten in der Stringtheorie auf. Die in ein Schwarzes Loch fallende Information wird als Wellen in den Branen gespeichert und kann schließlich wieder zum Vorschein kommen. Anfang 2004 stellten Samir Mathur von der Ohio State University ein Schwarzes Loch als gigantisches Stringknäuel dar. Dieser »Fuzzyball« dient als Speicher für die Information, die in den hineinstürzenden Objekten enthalten ist, und emittiert Strahlung, die diese Information wiedergibt. Hawking argumentierte kürzlich, Quantenfluktuationen würden verhindern, dass sich überhaupt ein wohldefinierter Ereignishorizont bilden kann. Über all diese Ideen ist das letzte Wort noch längst nicht gesprochen.

Die Evolution der Schwarzen Löcher

»Objekte, die so dicht sind, dass nicht einmal Licht zu entweichen vermag« – diese populäre Definition Schwarzer Löcher ist wahrscheinlich falsch. Seit Mitte der 1970er Jahre glauben die Physiker, dass aus einem Schwarzen Loch Energie entweichen kann, und heute meinen die meisten obendrein, dass diese Energie auch Information transportiert. Die Grafiken zeigen das Schwarze Loch von einem hypothetischen Standpunkt außerhalb der Raumzeit. Für Beobachter innerhalb der Raumzeit sieht es wie eine Kugel aus.



Bei klassischer Betrachtung, das heißt ohne Quantenphysik, stürzt ein Stück Materie durch den Ereignishorizont ins Innere des Schwarzen Lochs und kann danach weder entkommen noch seine Information hinaussenden. Sobald die Materie das Zentrum des Schwarzen Lochs – die Singularität – erreicht, werden Masse und Information komplett vernichtet.

Das Hawking-Modell ist ein erster Versuch, Quanteneffekte zu berücksichtigen. Am Ereignishorizont entstehen virtuelle Teilchenpaare (rote und blaue Kugeln). Ein Partner stürzt in die Singularität, aber der andere entkommt nach außen. Die Teilchenspins sind zufallsverteilt und enthalten keinerlei Information über die vom Loch verschlungene Materie.

Im Horowitz-Maldacena-Modell transportiert das entkommende Teilchen nicht nur Masse, sondern auch Information. Dieses Teilchen ist mit seinem ins Loch stürzenden Partner quantenmechanisch verschränkt – und dieser wiederum wird mit dem Stück Materie verschränkt. Die Verschränkung »beamt« die in der Materie enthaltene Information nach außen.

Die Eigenschaften von Schwarzen Löchern hängen aufs Engste mit denen der Raumzeit zusammen. Wenn ein Schwarzes Loch als Computer interpretiert werden kann, dann auch die Raumzeit. Sie müsste, quantenmechanisch betrachtet, eigentlich genauso diskret beschaffen sein wie alle anderen physikalischen Systeme (siehe »Quanten der Raumzeit« von Lee Smolin, Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 54). Abstände und Zeitintervalle kann man nicht beliebig genau messen. In kleinstem Maßstab ist die Raumzeit blasig und schaumig. Die maximale Informationsmenge, die sich in ein Raumgebiet packen lässt, hängt davon ab, wie klein die Bits sind – und die wiederum können nicht kleiner sein als die schaumigen Zellen.

Seit Langem vermuten Theoretiker, dass diese Zellen von der Größenordnung der Planck-Länge l_P sind, die rund 10^{-35} Meter beträgt; erst bei solch winzigen Abständen spielen sowohl Quantenfluktuationen als auch Gravitationseffekte eine Rolle. Falls das zuträfe, würde man das schaumige Wesen der Raumzeit wegen seiner Winzigkeit niemals direkt beobachten können.

Doch wie einer von uns (Ng) zusammen mit Hendrik van Dam an der Universität von North Carolina in Chapel Hill und Frigyes Károlyházy an der Eötvös-Loránd-Universität in Ungarn gezeigt hat, sind diese Zellen viel größer. Eigentlich haben sie gar keine feste Größe: Je größer ein Raumzeitgebiet ist, desto größer sind auch seine Quantenzellen. Auf den ersten Blick mutet diese Behauptung paradox an – als wären die Atome in einem Elefanten größer als die in einer Maus. Interessanterweise folgerte Lloyd dies aus denselben Gesetzen, welche die Leistung von Computern einschränken.

Das Vermessen der Raumzeit-Geometrie ist ein Rechenvorgang, bei dem Abstände durch Informationsübertragung und -verarbeitung ermittelt werden. Angenommen, wir errichten in einem Raumgebiet ein Global Positioning System, das heißt wir platzieren darin einen Schwarm von Satelliten, die jeweils eine Uhr und ein Radiogerät an Bord haben (siehe Kasten auf S. 40). Um eine Entfernung zu messen, sendet ein Satellit ein Signal und stellt die Zeit bis zu dessen Ankunft fest. Die Messgenauigkeit hängt davon ab, wie schnell die Uhr tickt. Da das Ticken eine Rechenoperation ist, folgt sein Maximaltempo aus dem Margolus-Levitin-Theorem: Die Zeit zwischen zwei Ticks ist umgekehrt proportional zum Energieaufwand.

Diese Energie ist ihrerseits begrenzt. Wenn wir die Satelliten mit zu viel Energie ausstatten oder zu dicht packen, bilden sie ein Schwarzes Loch und können nicht mehr an der Vermessung teilnehmen. Das Loch wird zwar Hawking-Strahlung aussenden, doch deren Wellenlänge ist ungefähr so groß wie das Loch selbst und somit ungeeignet, feinere Strukturen zu erfassen. Die maximale Gesamtenergie der Satellitenflotte ist proportional zum Radius des zu vermessenden Gebiets.

Grenzen der Genauigkeit von Raumzeit-Vermessungen

Somit wächst die Energie langsamer als das Volumen des Gebiets. Je größer das Gebiet wird, desto mehr Kompromisse muss der Raumzeit-Vermesser eingehen: Entweder er vermindert die Satellitendichte und nimmt damit größere Abstände in Kauf, oder er reduziert die pro Satellit verfügbare Energie und lässt dadurch die Uhren langsamer ticken. So oder so wird die Messung ungenauer. In der zur Vermessung einer Region mit dem Radius R erforderlichen Zeit beträgt die Gesamtzahl der Ticks sämtlicher Satelliten R^2/l_P^2.

Wenn jeder Satellit während des Vermessungsvorgangs genau einmal tickt, beträgt der mittlere Abstand zwischen den Satelliten $R^{1/3} l_P^{2/3}$. Zwar können in einem Teilgebiet kürzere Abstände vermessen werden – aber nur um den Preis ungenauerer Messungen anderswo. Diese Schlussfolgerung gilt auch dann, wenn der Raum expandiert.

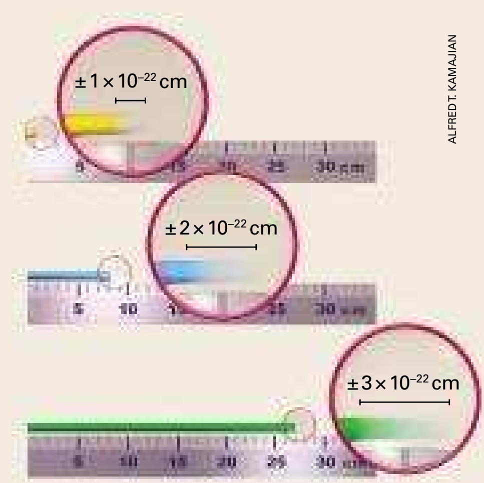
Die Formel gibt an, bis zu welcher Genauigkeit Entfernungen bestimmt werden können. Sie beschreibt den Grenzfall, in dem der Messapparat kurz davor steht, zu einem Schwarzen Loch zu kollabieren. Unterhalb dieses minimalen Maßstabs hört die Geometrie der Raumzeit auf zu existieren. Dieses Präzisionsniveau ist zwar immer noch sehr klein, liegt aber um viele Größenordnungen über der Planck-Länge. Der mittlere Messfehler bei der Größenbestimmung des beobachtbaren Universums beträgt 10^{-15} Meter. Diese Ungenauigkeit wäre mit präzisen Entfernungsmessgeräten nachzuweisen – etwa ▷

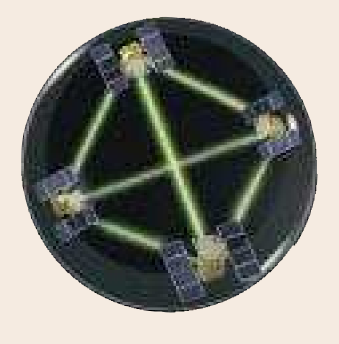
Raumzeit-Vermessung als Rechenvorgang

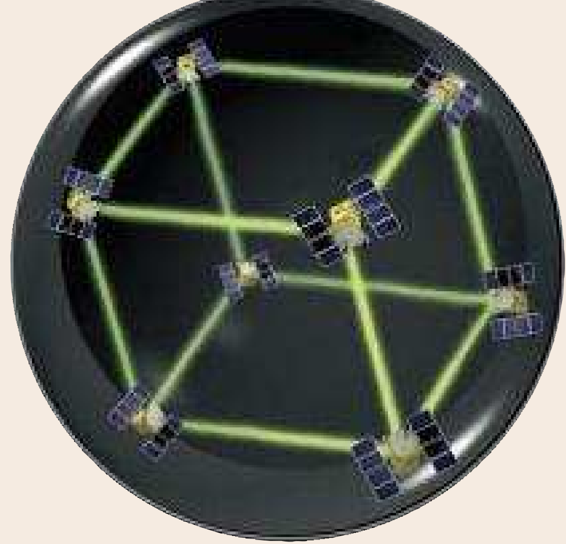
Das Messen von Abständen und Zeitintervallen ist eine Berechnung und unterliegt darum denselben Beschränkungen wie die Datenverarbeitung in Computern. Wie sich zeigt, ist die Messung ein viel heiklerer Prozess als vermutet.

Zur Vermessung eines Raumvolumens eignet sich ein Schwarm von Satelliten nach Art des Global Positioning System. Die Satelliten führen Messungen aus, indem sie Signale aussenden und deren Ankunftszeit ermitteln. Um die Genauigkeit zu steigern, braucht man immer mehr Satelliten. Doch ihre Anzahl lässt sich nicht beliebig erhöhen: Werden zu viele Satelliten eingesetzt, kollabiert das ganze System als Schwarzes Loch.

Für ein Gebiet mit doppeltem Radius kann man doppelt so viele Satelliten einsetzen. Doch da das Volumen nun achtmal so groß ist, wachsen die Abstände. Jeder Satellit muss ein größeres Teilgebiet abdecken und kann weniger Einzelmessungen erfassen. Dadurch sinkt deren Genauigkeit.







▲
Radius: 100 km
Satellitenanzahl: 4
Abstände: 90 km

▶
Radius: 200 km
Satellitenanzahl: 8
Abstände: 150 km
Fehlerzunahme: 26 %

Die Messgenauigkeit ist nicht konstant, sondern hängt von der Größe des gemessenen Objekts ab. Je größer das Objekt, desto unbestimmter seine Details. Dies widerspricht der Alltagserfahrung: Normalerweise hängt die Messgenauigkeit nicht vom Objekt ab, sondern nur davon, wie fein das Lineal unterteilt ist. Doch bei Vermessungen der Raumzeit ist es, als würde deren Feinstruktur durch die Auswahl des Messgebiets beeinflusst.

▷ mit künftigen Gravitationswellen-Observatorien.

Uns Theoretikern ermöglicht dieses Resultat eine neue Sicht auf Schwarze Löcher. Wie Ng zeigte, öffnet die eigenartige Größenabhängigkeit der Raumzeit-Fluktuationen von der Kubikwurzel der Entfernungen ein Hintertürchen, durch das sich die Bekenstein-Hawking-Formel für die Speichergröße Schwarzer Löcher herleiten lässt.

Außerdem folgt daraus eine universelle Schranke für alle Schwarzes-Loch-Computer: Die Anzahl der Bits im Speicher ist proportional zum Quadrat der Rechengeschwindigkeit. Der Proportionalitätsfaktor ist Gh/c^5. Darin kommt mathematisch der Zusammenhang zwischen Information, Spezieller Relativitätstheorie (deren wichtigster Parameter die Lichtgeschwindigkeit c ist), Allgemeiner Relativitätstheorie (Gravitationskonstante G) und Quantenmechanik (Wirkungsquantum h) zum Ausdruck. Wohl am wichtigsten ist, dass dieses Resultat direkt zum holografischen Prinzip führt, dem zufolge unser dreidimensionales Universum in gewissem Sinne eigentlich zweidimensional ist. Die maximale Informationsmenge, die ein Raumgebiet zu speichern vermag, scheint nicht proportional zu seinem Volumen, sondern zu seiner Oberfläche zu sein (siehe »Das holografische Universum« von Jacob D. Bekenstein, Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 34). Üblicherweise wird vermutet, das holografische Prinzip folge aus bislang unbekannten Details der Quantengravitation, doch es geht auch unmittelbar aus den fundamentalen Quantengrenzen der Messgenauigkeit hervor.

Die Prinzipien der Computertheorie lassen sich nicht nur auf die kompaktesten Rechner – Schwarze Löcher – und die kleinstmöglichen Rechner – den Raumzeit-Schaum – anwenden, sondern auch auf den allergrößten Computer: das Universum. Das All könnte durchaus unendlich groß sein, aber es existiert – zumindest in seiner gegenwärtigen Gestalt – erst seit endlicher Zeit. Sein beobachtbarer Teil hat gegenwärtig einen Durchmesser von einigen zehn Milliarden Lichtjahren. Damit wir die Resultate einer Berechnung kennen, muss sie innerhalb dieser Zeitspanne stattgefunden haben.

Was berechnet das Universum?

Die obige Analyse tickender Uhren liefert auch die maximale Anzahl der Rechenoperationen, die im Universum seit seiner Entstehung abgelaufen sein können: 10^{123}. Vergleichen wir diese Schranke mit dem insgesamt vorhandenen Materievorrat. Er besteht aus der sichtbaren Materie, der Dunklen Materie sowie der so genannten Dunklen Energie, die das

Universum veranlasst, beschleunigt zu expandieren. Die beobachtete kosmische Energiedichte liegt bei 10^{-9} Joule pro Kubikmeter; demnach enthält das Universum 10^{72} Joule Energie. Nach dem Margolus-Levitin-Theorem vermag es bis zu 10^{106} Operationen pro Sekunde auszuführen, das heißt alles in allem 10^{123} Operationen von Anfang bis heute. Das bedeutet: Unser Universum hat tatsächlich die maximale Anzahl an Rechenoperationen ausgeführt, welche die physikalischen Gesetze zulassen.

Dunkle Energie
Rechentempo: 10^{-18} Hertz
Speicher: < 10^{123} Bits

Universum

Materie
Rechentempo: 10^{14} Hertz
Speicher: 10^{92} Bits

ALFRED T. KAMAJIAN

◀ **Das Universum ist ein Computer, der aus zwei Komponenten besteht: Die Materie (rot) ist äußerst dynamisch; sie verhält sich wie ein Parallelrechner mit hoher Rechengeschwindigkeit. Die Dunkle Energie (grau) scheint hingegen nahezu statisch zu sein; sie verhält sich wie ein langsamerer serieller Computer. Beide Komponenten zusammen führen so viele Rechenoperationen aus, wie die Gesetze der Physik maximal zulassen.**

Um die gesamte Speicherkapazität der gewöhnlichen, beispielsweise aus Atomen zusammengesetzten Materie zu berechnen, kann man Standardmethoden aus Statistischer Mechanik und Kosmologie anwenden. Materie vermag am meisten Information zu speichern, wenn sie in energiereiche masselose Teilchen umgewandelt wird, etwa in Neutrinos oder Photonen; deren Entropiedichte ist proportional zur dritten Potenz ihrer Temperatur. Die Energiedichte der Teilchen – die festlegt, wie viele Operationen sie ausführen können – steigt mit der vierten Potenz ihrer Temperatur.

Eine optimale Rechenmaschine voll Dunkler Energie

Daher ist die Gesamtzahl an Bits gleich der Anzahl der Operationen (10^{123}) hoch drei Viertel. Für das gesamte Universum ergibt das 10^{92} Bits. Wenn die Teilchen eine innere Struktur aufweisen, könnte die Bitanzahl etwas höher sein. Da diese Bits schneller umschalten, als sie miteinander kommunizieren, ist die gewöhnliche Materie ein hochgradig paralleler Computer – wie der ultimative Laptop, aber anders als das Schwarze Loch.

Die Physiker wissen nicht, was die Dunkle Energie ist, und erst recht nicht, wie viel Information sie speichern kann. Doch aus dem holografischen Prinzip folgt, dass das Universum maximal 10^{124} Bits zu speichern vermag – fast genauso viel wie die Gesamtzahl der Operationen. Diese ungefähre Übereinstimmung ist kein Zufall. Unser Universum ist nahe seiner kritischen Dichte. Wäre es ein klein wenig dichter, hätte es einen Gravitationskollaps erlitten wie Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt. Daher erfüllt es annähernd die Bedingung für eine maximale Anzahl an Rechenoperationen. Dieses Maximum beträgt R^2/l_P^2 – genauso viel wie die Bitanzahl, die das holografische Prinzip ergibt. Die maximale Bitanzahl, die das Universum in jeder Phase seiner Geschichte enthalten hat, ist ungefähr gleich der Anzahl der Rechenoperationen, die es bis zu jenem Augenblick ausführen konnte.

Während gewöhnliche Materie eine gigantische Anzahl von Operationen ausführt, verhält sich die Dunkle Energie ganz anders. Wenn sie die Maximalzahl der nach dem holografischen Prinzip erlaubten Bits kodiert, hatte die überwältigende Mehrheit dieser Bits im Laufe der kosmischen Geschichte nur Zeit für ein einziges Umschalten.

Darum sind diese exotischen Bits bloß passive Zuschauer bei den viel schnelleren Rechenoperationen, welche die kleinere Anzahl gewöhnlicher Bits ausführt. Was auch immer die Dunkle Energie sein mag, sehr viel Rechenarbeit leistet sie nicht. Das muss sie auch gar nicht. Die fehlende Masse des Universums zu liefern und seine Expansion zu beschleunigen, das sind – computertechnisch betrachtet – ziemlich simple Aufgaben.

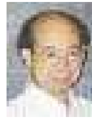
Was berechnet das Universum? Soweit wir wissen, liefert es keine eindeutige Antwort auf eine eindeutige Frage. Vielmehr berechnet das Universum sich selbst. Mit seiner Software, dem Standardmodell der Teilchenphysik, berechnet das Universum Quantenfelder, chemische Substanzen, Bakterien, Menschen, Sterne und Galaxien. Während es rechnet, vermisst es seine eigene Raumzeit-Geometrie mit der äußersten Präzision, welche die physikalischen Gesetze zulassen. Berechnung ist Existenz.

Indem diese Resultate gewöhnliche Computer, Schwarze Löcher, Raumzeit-Schaum und Kosmologie umspannen, zeugen sie von der Einheit der Natur. Sie demonstrieren die begriffliche Einheitlichkeit der Grundlagenphysik. Obwohl die Physiker noch keine vollständige Theorie der Quantengravitation besitzen, wissen sie doch schon, dass die künftige Theorie aufs Engste mit Quanteninformation zusammenhängen wird. Kurz: Es kommt vom Qubit. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Seth Lloyd ist Professor für quantenmechanische Technik am Massachusetts Institute of Technology und hat den ersten praktikablen Quantencomputer entwickelt.



Y. Jack Ng ist Physikprofessor an der University of North Carolina in Chapel Hill und untersucht die Grundlagen der Raumzeit. Er hat mehrere Verfahren vorgeschlagen, um die Quantenstruktur der Raumzeit experimentell zu erforschen.

The new language of science. Von Hans Christian von Baeyer. Harvard University Press, 2004

The black hole final state. Von Gary T. Horowitz und Juan Maldacena in: Journal of High Energy Physics, JHEP02(2004)008

Computational capacity of the universe. Von Seth Lloyd in: Physical Review Letters, Bd. 88, Artikel 2379017 (2002)

From computation to black holes and space-time foam. Von Y. Jack Ng in: Physical Review Letters, Bd. 86, S. 2946 (2001). Erratum, Bd. 88, Artikel 139902 (E) (2002)

Ultimate physical limits to computation. Von Seth Lloyd in: Nature, Bd. 406, S. 1047 (2000)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREIFEN

Eine tragende Rolle

Ein ausgetüftelter Materialmix hält Fahrzeuge sicher in der Spur.

Von Bernhard Gerl und Rolf Sterbak

Vier gerade mal postkartengroße Flächen bringen die Kräfte des Motors auf die Straße, trotzen in Kurven Fliehkräften und halten auch auf nassen Blättern und festgefahrener Schneedecke den Kontakt zur Fahrbahn. Zudem gleicht die komprimierbare Luft im Innern Unebenheiten aus und federt leichte Stöße ab. Trotz der Strapazen wahren Reifen auch bei hohen Drehzahlen ihre Form. Dafür sorgt ein komplexer Aufbau aus bis zu 200 Materialien wie Kautschuk, Stahl, Textilien, Kunststoffen und Ruß.

Kautschuk gibt die erforderliche Elastizität, dichtet ab und leitet gemeinsam mit dem Ruß Wärme ab, die durch Reibung und Kompression der Luft entsteht. Insbesondere Gewebelagen halten die Form. Beim so genannten Diagonalreifen kreuzen sich ihre Fäden in einem spitzen Winkel. Das macht den Reifen zwar fest, aber auch hart. Dieser Typ wird heute nur noch bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen und Motorrädern eingesetzt. Pkws fahren derzeit auf Radialreifen. Wie der Name schon sagt, verlaufen die Textilfäden dort radial von der Achse aus entlang der Seitenwand und queren die Lauffläche beinahe in einem 90-Grad-Winkel. Den Gürtelreifen verstärkt ein zusätzlicher steifer Ring aus Textilfasern oder Stahlseilen.

Die Lauffläche unterteilt ein Profil aus längs und quer verlaufenden Rillen in blockartige Bereiche. Wasser auf der Straße kann so seitlich abfließen. Einschnitte in den Profilblöcken, die Lamellen, vermitteln zusätzliche Reibung und damit Haftung. Allerdings erhöht eine solche Struktur auch das Abrollgeräusch.

Ab einer Geschwindigkeit von sechzig Kilometer pro Stunde hört man sogar hauptsächlich den Reifen, nicht den Motor. Die Europäische Union fordert deshalb ab 2007 auch diesen Anteil am Fahrzeuglärm zu reduzieren. Dazu schneiden die Ingenieure Profilblöcke schräg, sodass ihre Einlaufkanten nicht auf einmal die Straße berühren, sondern abrollen wie ein guter Laufschuh. Neben dem Reifengeräusch senkt das den Rollwiderstand, spart also Treibstoff.

Lärm entsteht auch bei höheren Geschwindigkeiten, wenn die Luft beim Straßenkontakt zwischen den Profilblöcken zusammengepresst wird und pfeifend entweicht. Dafür gibt es derzeit noch keine überzeugende Lösung.

Zu den großen Themen der Reifenentwickler gehört auch die Verkehrssicherheit. Sensoren messen zum Beispiel den Schlupf der Reifen für das Antiblockiersystem (ABS): Verliert ein Rad beim Bremsen die Bodenhaftung, dreht es durch, die Steuerelektronik löst die Bremse, bis der Kontakt zur Straße wieder hergestellt ist. Künftig sollen Sensoren dazukommen, die direkt die am Reifen auftretenden Kräfte messen können, woraus der Bordcomputer eventuell notwendige automatische Abbremsmanöver errechnen kann.

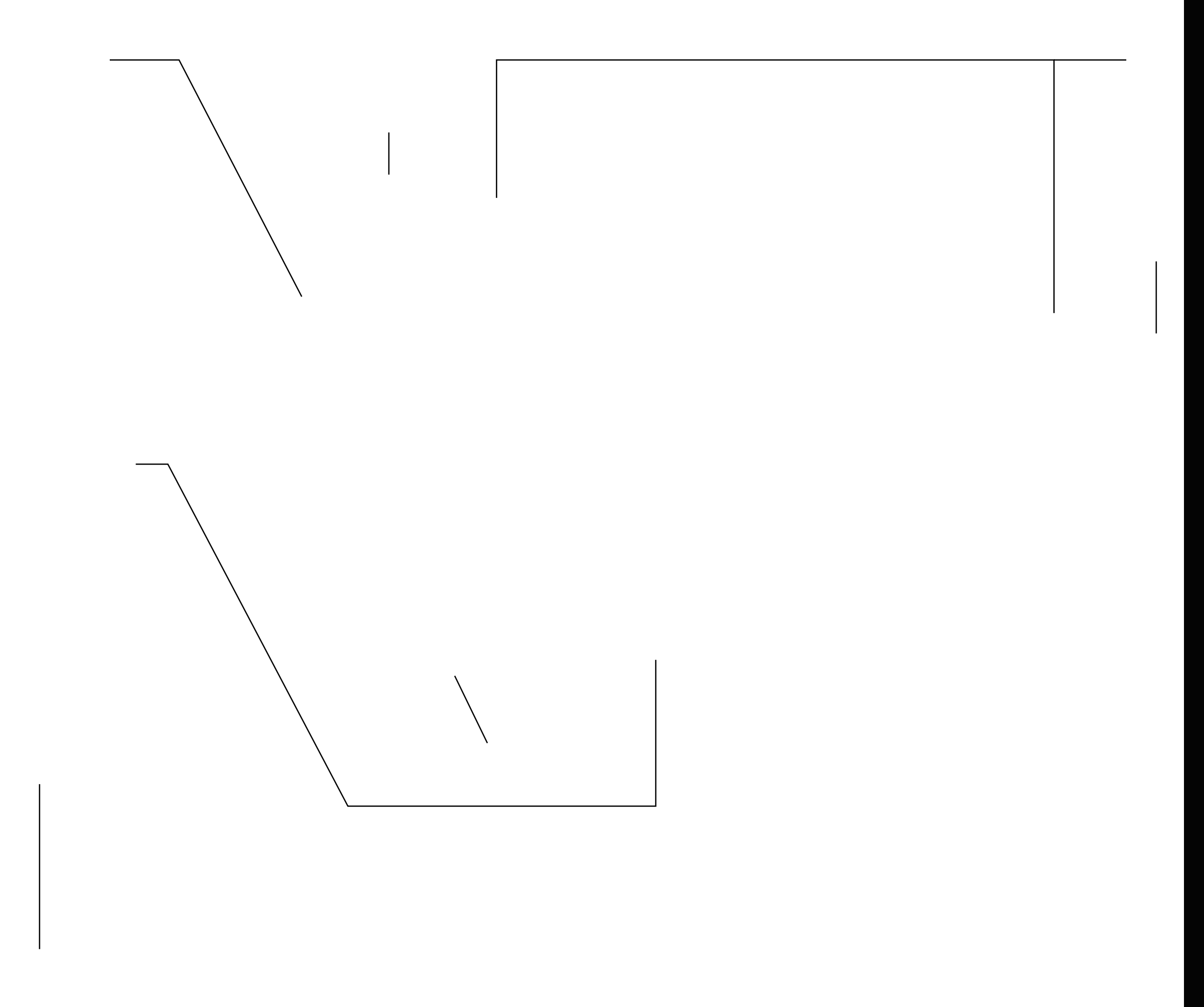
Laut einer Studie des ADAC fährt mehr als ein Drittel aller Fahrzeuge mit zu geringem Reifendruck. Die Gefahr: Der Gummimantel erhitzt sich zu stark und löst sich im schlimmsten Fall ab. Weil mit starkem Druckverlust erhöhter Schlupf einhergeht, entwickelten Dunlop und Bridgestone eine Software, die Informationen der ABS-Sensoren unter diesem Aspekt auswertet. Siemens VDO und Goodyear wollen sogar einen Drucksensor im Reifen einbetten, der über einen wenige Quadratmillimeter großen Sender (Transponder) Daten zu Druck und Temperatur an den Bordcomputer übermittelt. Anhand von Radumfang und Drehzahl bestimmt dieser die schon zurückgelegten Kilometer und errechnet bei Druckverlust die noch tolerierbare Strecke.

Reifen mit »Notlaufeigenschaften« halten bei gedrosseltem Tempo auch ohne Luft noch 50 bis 150 Kilometer, etwa indem verstärkende Streifen die Seitenwand stützen. Allerdings sind solche Reifen härter und haben einen höheren Rollwiderstand. Diesen Nachteil umgeht das PAX-System von Michelin: Ein Innenring aus Gummi stützt bei einer Panne die Lauffläche; allerdings benötigt dieses System eine spezielle Felge. Das Tochterunternehmen Kleber entwickelt sogar einen selbstheilenden Reifen: Bis 4,7 Millimeter große Löcher in der Lauffläche dichtet eine hochelastische Schicht aus Polymeren ab. ◁

Der Autor **Bernhard Gerl** ist freier Autor in Regensburg, **Rolf Sterbak** Technikjournalist in Stuttgart.



Sinkt die Temperatur unter plus sieben Grad Celsius, empfehlen Experten Winterreifen. Nicht nur verdrängt ihr Profil Matsch und Schnee besser, die Gummimischung eines Sommerreifens wird auch zu hart, was den Bremsweg verlängert und die Seitenführung verschlechtert. Ein höherer Anteil Naturkautschuk hält Winterreifen bei Minusgraden elastisch.



Mythos Pest

War der schwarze Tod wirklich so schrecklich wie oft angenommen? Steckte hinter dem Seuchenzug einzig und allein die Pest? Die Ereignisse vor allem im 14. Jahrhundert deuten auch auf andere Ursachen hin.

Von Manfred Vasold

»Ungefähr am Frühlingsanfang ... begann die Seuche ihre entsetzlichen und verheerenden Wirkungen zu offenbaren. Zuerst bildeten sich bei Männern und Frauen Schwellungen in der Leistenbeuge oder in der Achselhöhle, zuweilen so groß wie ein gewöhnlicher Apfel oder wie ein Hühnerei, die schlichtweg Pestbeulen genannt wurden. Später … erschienen überall am Körper schwarze oder bläuliche Flecken … Sie waren immer Vorboten des Todes.«

Wie Giovanni Boccaccio in der Rahmenhandlung seines 1348 begonnenen »Dekameron« weiter schilderte, greife die Seuche »ähnlich wie Feuer auf Reisig« über. Welch ungeheures Grauen die aus Asien vordringende Pestwelle in der Mitte des 14. Jahrhunderts in Europa heraufbeschwor, spiegelt sich schon in ihrem späteren Beinamen: der schwarze Tod. Seither gilt er als Inbegriff eines unaufhaltsamen Seuchenzugs. Zeitgenössische Zeugnisse wie auch spätere Schilderungen haben das allgemeine Schreckensbild von der Pest bis in die Gegenwart geprägt.

Der schwarze Tod soll, so einer der damaligen Chronisten, ein Drittel der Bevölkerung Europas dahingerafft haben. Einige Forscher, die sich vorbehaltlos auf diese Angabe stützten, bezifferten die absolute Zahl der Opfer auf mehr als 25 Millionen allein bei der ersten Welle. Doch sind die Zeitdokumente, wie die meisten mittelalterlichen Schilderungen von Sachverhalten, ziemlich unvollständig, nicht selten übertrieben und wenig eindeutig – zumal die Begriffe Pest oder Pestilenz auch als Synonym für eine Seuche schlechthin verwendet wurden. Hinzu kommt, dass die Biologie der Pest zu manchen Annahmen nicht so recht passen will, die sich wie ein Mythos gehalten haben. Nach mehr als hundert Jahren wissenschaftlicher Erforschung muss der schwarze Tod nun in einigen seiner Aspekte in einem neuen Licht gesehen werden.

Zu den legendären Zügen des schwarzen Todes gehört, dass ihn ein barbarischer Akt biologischer Kriegführung ausgelöst haben soll. Vielleicht nach Erzählungen von Augenzeugen verzeichnete der Notar Gabriele de' Mussis (etwa 1280 – 1356), eine Armee des Mongolenreichs habe drei Jahre lang die genuesische Handelskolonie Kaffa auf der Krim belagert. Schließlich aber seien diese »Tataren und Sarazenen« im Jahr 1346 täglich zu Tausenden von »einer mysteriösen Krankheit« befallen worden, die »Schwellungen in der Achselhöhle oder an den Leisten«, ein »fauliges Fieber« und schließlich den Tod verursachte. Da hätten die Krieger »Berge von verwesenden Leichen« in die Festung katapultiert und die Einwohnerschaft infiziert. Wohin geflohene Überlebende dann auch kamen – »jede Stadt, jede Siedlung, jeder Ort wurde von der ansteckenden Pestilenz vergiftet, und die Bürger, sowohl Männer wie Frauen, starben augenblicklich«.

IN KÜRZE

- Nach mehr als hundert Jahren wissenschaftlicher Erforschung sind sich die Experten noch immer uneins über manche Aspekte der großen **Pestpandemie im Spätmittelalter,** selbst darüber, ob es überhaupt die Pest war.
- Offenbar trugen zu dem **starken Bevölkerungsrückgang** im 14. Jahrhundert auch verschiedene andere krisenhafte Entwicklungen zu späteren Pestausbrüchen bei.

Nach drei Tagen tot

Fakt ist, dass die große Seuche Mitte des 14. Jahrhunderts von Asien vordrang und sich auch über Nordafrika und den Nahen Osten ausbreitete. Das eigentliche Ursprungsgebiet konnte nie ermittelt werden; in Frage kommen China, die Mongolei, Indien und Zentralasien. Wo immer die Pestwelle begonnen haben mag, sie stieß offensichtlich aus den

Steppen nördlich des Kaspischen und Schwarzen Meeres zur Krim vor. Von hier, nicht unbedingt von Kaffa selbst aus, griff sie auf den Mittelmeerraum über: Im Frühjahr 1347 traf sie Konstantinopel, im September Alexandria in Ägypten und im Oktober Messina auf Sizilien.

Anfang 1348 traten erste Erkrankungen auch an den nördlichen Küsten des Mittelmeers auf, darunter Venedig und Genua. Wie schon de' Mussis notiert hatte, scheint die Seuche zumindest anfangs höchst ansteckend gewesen zu sein. Es genügte, so ist in mehreren anderen Quellen vermerkt, mit einem Kranken zu sprechen oder anzufassen, was er zuvor berührt hatte, um zu erkranken. »Von den Infizierten lebte kaum einer noch länger als drei Tage«, heißt es in der »Florentinischen Chronik«, die Marchione di Coppo Stefani um 1380 verfasste. »Trat die Seuche in einem Haus auf, war es oft so, dass keine einzige Person darin überlebte.« Überdies starben »die empfindsamen Tiere wie Hunde und Katzen, Rinder, Esel und Schafe«. Boccaccio, der in der Rahmenhandlung seines »Dekameron« sieben Frauen und drei Männer vor der Pest in Florenz aufs Land fliehen lässt, beschrieb sogar, wie zwei Schweine in der Kleidung einer Pestleiche wühlten: »Kaum eine Stunde später fielen sie beide, nach ein paar Zuckungen, als ob sie Gift genommen hätten, tot auf die Lumpen hin.«

Einige Großstädte erlitten immense Verluste. Angeblich büßte Florenz fast die Hälfte seiner Einwohner ein, Venedig einen noch etwas höheren Anteil.

Den zeitgenössischen Schilderungen zufolge breitete sich die Seuche also in Italien geradezu explosiv aus. In der Vergangenheit nahmen daher manche Historiker an, diese erste Welle sei ähnlich den Pocken oder der Grippe weitergerast, habe überall großflächig jede berührte Region, jede Stadt überrollt. Doch schon in Italien blieben selbst regionale Metropolen wie Mailand vorläufig verschont.

Auf dem Seeweg allerdings reiste die Pest durchaus rasch weiter. Marseille scheint sie fast zeitgleich wie Genua erreicht zu haben. Der Hafen von Bor- ▷

▲ Die Pest in Florenz, dargestellt von einem unbekannten Künstler nach den Beschreibungen von Giovanni Boccaccio, soll »ähnlich wie Feuer auf Reisig« um sich gegriffen haben. Manche Forscher vermuten hinter dem »Großen Sterben« daher noch andere Erreger als das Pestbakterium.

▷ deaux wiederum bildete ein Sprungbrett zur Südküste Englands, wo die Pest im Juni 1348 begann, sowie zur Nordküste Frankreichs. In Paris trat sie erstmals im August 1348 auf. Vom weiteren Vormarsch im Norden blieben aber interessanterweise einige dicht besiedelte Regionen wie Brabant und die südlichen Niederlande unberührt.

Währenddessen rückte die Seuche von Italien auf dem Landweg nach Mitteleuropa vor, viel langsamer allerdings als noch bis vor Kurzem gedacht. Wien und Basel wurden zwar im Frühjahr 1349 erreicht. Hingegen fand sich neueren Untersuchungen zufolge für zahlreiche süddeutsche Städte, die alle an wichtigen Straßenverbindungen oder Flüssen liegen, bis 1356 kein Hinweis auf ein Massensterben. Das gilt für Passau, Regensburg, München, Ingolstadt, Augsburg, Nürnberg, Würzburg, Rothenburg ob der Tauber, Kempten und Memmingen. Die Alpen wirkten zumindest als gewisse Seuchenbarriere, obgleich die Krankheit Bergbewohner auf der Südseite recht schnell erfasst haben soll.

Auch etliche größere Städte im westlichen Deutschland wurden von der ersten Infektionswelle wahrscheinlich nicht erfasst, zum Beispiel Trier, Frankfurt am Main, Düsseldorf, Duisburg und Göttingen. Von einem Flächenbrand kann also kaum die Rede sein. Allerdings gibt es in Deutschland so gut wie keine Überlieferung für das flache Land, wo die große Mehrheit der Bevölkerung lebte.

Gefährliche Flöhe

Der letzte weltweite Seuchenzug der Pest, er startete um 1890 von Innerasien aus, brachte zugleich den wissenschaftlichen Durchbruch. Aus der Pestbeule einer Leiche in Hongkong isolierte der Schweizer Tropenmediziner Alexandre Yersin 1894 den Erreger: ein gramnegatives, kurzes, unbewegliches Stäbchenbakterium. Zunächst als *Pasteurella pestis* bezeichnet, wurde es 1971 dem Entdecker zu Ehren in *Yersinia pestis* umbenannt.

Wie aber wurde die Beulenpest übertragen? Nicht über den Kot infizierter Ratten, fand der Bakteriologe Paul-Louis Simond 1897 in Indien heraus, sondern über deren Flöhe. Simond, der Yersin ablösen sollte, hatte in Bombay Station gemacht, wohin die Seuche inzwischen gelangt war.

Heute bestehen auf drei Kontinenten so genannte Naturherde: in Teilen Asiens, Afrikas sowie Nord- und Südamerikas. Als eigentliche Wirtspopulationen dienen dem Erreger in den Rückzugsgebieten wild lebende Nagetiere, darunter Bobak, Erd- und Backenhörnchen. Der Infektionszyklus zwischen ihnen und ihren typischen Flöhen ist unablässig in Gang, aber gewöhnlich nicht bedrohlich. Ratten bilden eine Infektbrücke zu Siedlungen. Sterben sie in Massen, ist die Gefahr groß, dass die Seuche im Wortsinne auf Menschen überspringt: Die Rattenflöhe verlassen die erkaltenden Kadaver und nehmen, wenn sie keine ihrer üblichen Wirte mehr finden, mit anderen Warmblütern vorlieb. Die Pestbakterien, die sich im Vormagen des Rattenflohs vermehren (Foto), werden beim Blutsaugen weiter übertragen.

Allerdings kann auch der Menschenfloh *(Pulex irritans)* die Erreger verbreiten: wenn er welche von einem Infizierten aufnimmt, dann einen Gesunden sticht und dabei bakterienhaltigen Kot abgibt, den der Betroffene unwillkürlich in die juckende Saugstelle reibt. Der direkte Kontakt mit befallenen Tieren ist ebenfalls nicht ungefährlich.

▼ **Vollgesaugt mit Blut zeigt dieser Rattenfloh drei Tage nach der Mahlzeit an dem dunklen Fleck rechts am Magen, dass sich Pestbakterien in seinem Vormagen vermehrt haben.**

Lärm gegen Ratten

Was ganze Regionen anbelangt, so war nachweislich Böhmen zunächst nicht betroffen, obwohl Prag unter König Karl IV. – von 1355 an Kaiser – zum geistigen Mittelpunkt des Reiches wurde und die gerade 1348 gegründete Universität großen Zulauf hatte. Dorthin gelangte die Pest erst 1357. Weite Landstriche von der Elbe bis jenseits von Oder und Weichsel blieben sogar gänzlich ausgespart, obgleich die Seuche bis 1353 tief nach Russland vordrang. In den Annalen von Breslau ist erst für 1373 eine »maxima pestilentia« verzeichnet, also während eines neuerlichen Ausbruchs.

In den verkehrsreichen Hafenstädten Lübeck und Hamburg hingegen verursachte der schwarze Tod sogleich hohe Verluste. In Lübeck erlag ihm auch etwa jeder vierte Ratsherr. In Hamburg scheint es 1350 ein Massensterben gegeben zu haben, vor allem unter den Bürgern, die beruflich mit Nahrungsmitteln zu tun hatten. Das passt zur Beulenpest, denn Ratten – als Erregerreservoir – nisten sich gerne dort ein, wo sie stets etwas zu fressen finden, nicht aber bei Schlossern und Schmieden, weil sie Lärm nicht mögen.

Zur Beulenpest passt auch, dass sich die Seuche nördlich der Alpen viel langsamer und dabei weniger flächendeckend ausbreitete als ursprünglich angenommen. Rattenflöhe, die den Erreger übertragen, nehmen den Menschen nur ungern als Ersatz – meist nur, wenn der Rattenwirt verendet und kein anderer tierischer Warmblüter greifbar ist (siehe Kasten links).

Angesichts dieser umständlichen Übertragung befremdet die explosive Ausbreitung der Seuche in Italien. War es dort wirklich die Beulenpest? »Wie

vermochte sich die Krankheit so schnell und so machtvoll nicht nur zu Wasser, sondern auch zu Lande auszubreiten?«, fragte 1997 der amerikanische Sozialhistoriker David Herlihy. »Menschen können andere Menschen nicht infizieren, und die Hausratte soll ein häusliches Tier sein, das nicht spontan wandert.« (Ersteres gilt allerdings nur bedingt, siehe Kasten rechts.)

In diesem Zusammenhang mutet besonders seltsam an, dass dem schwarzen Tod anscheinend nicht ein Sterben der Ratten vorausging, wie man es sonst bei der Pest beobachtet hatte, so 1897 in Indien und oftmals früher. Sollte allen Zeitzeugen dieses Omen entgangen sein, fragte Herlihy weiter, oder sei es damals überhaupt nicht aufgetreten?

»In irgendeiner Form muß der Mechanismus der Infektion ein anderer gewesen sein, als er uns von der Pest der warmen Länder bekannt ist«, hatte der Tropenmediziner Ernst Rodenwaldt schon 1953 in seiner Studie »Die Pest in Venedig 1575 – 1577« konstatiert. Auch er stützte sich auf den Befund, dass bei den mittelalterlichen Seuchenzügen kein Rattensterben registriert wurde und dass Rattenflöhe nur ausnahmsweise Menschen befallen. Überdies, so machte er geltend, habe die Pest in Europa ein grundlegend anderes Erscheinungsbild gezeigt als die um 1900 in Asien. Sie sei in Europa nämlich vorwiegend innerhalb von Familien übertragen worden, also wohl direkter von Mensch zu Mensch. Sehr viel häufiger seien schwärzliche nekrotische Flecken auf der Haut aufgetreten, die er als Folge kleiner Blutergüsse durch Flohstiche deutete. Seine Schlussfolgerung: Die Infektionen in unseren Breiten stammten von Menschenflöhen.

Flohmonat September

Nach heutiger Erkenntnis können zwar der Menschenparasit sowie Dutzende weitere Floharten in verschiedenen Teilen der Welt das Pestbakterium mehr oder weniger gut übertragen, außerdem etliche andere Nagetierarten es beherbergen. In unseren kühl-gemäßigten Breiten vermehren sich Menschenflöhe jedoch nur im Sommer stark. Der »Flohmonat« ist hier der September. Um aber die Beulenpest zu verbreiten, müsste der Menschenparasit seine Opfer in Massen befallen. In Italien wurde der Gipfel der Sterblichkeit jedoch bereits im Juli 1348 erreicht.

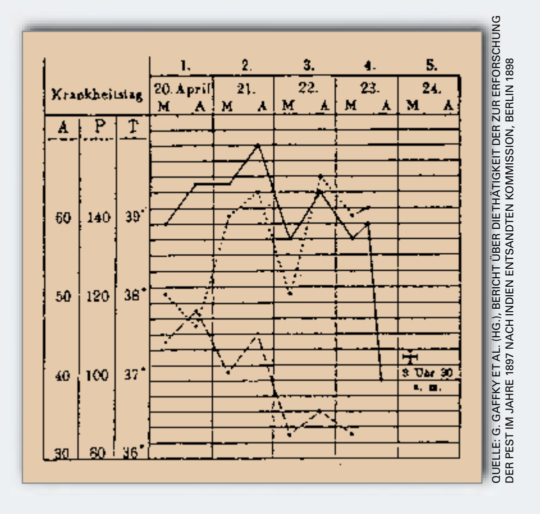
Wie die Krankheit verläuft

Die meisten menschlichen Opfer infizieren sich durch Flohstiche. Nach etwa zwei bis sechs Tagen kommt es zu Fieber und Schüttelfrost, Kopf- und Gliederschmerzen, Benommenheit und einem schweren Krankheitsgefühl. Charakteristisch für die Beulen- oder Bubonenpest sind schmerzhafte Schwellungen von Lymphknoten in Leistengegend, Nacken oder Achselhöhle. Der Erreger kann dann auf verschiedene Organe, darunter die Lunge, übergreifen. Unbehandelt sterben mehr als 50 Prozent der Beulenpestkranken. Offenbar traten bei der grausigen Epidemie in Europa Mitte des 14. Jahrhunderts auffällig oft ausgedehnte schwarzblaue Hautblutungen auf; daher nannte man die Seuche später den schwarzen Tod.

Unbehandelt endet die Lungenpest fast immer tödlich, primär ausgelöst durch Einatmen des Erregers, der dann wiederum durch Tröpfcheninfektion weitergegeben wird. Die Krankheit kann manchmal schon binnen weniger Stunden plötzlich beginnen und sich am nächsten Tag zu einer Pestpneumonie mit blutig-eitrigem Auswurf entwickeln.

Eine Pestsepsis, eine »Blutvergiftung«, tritt zwar unter Umständen als Erstes nach einer Ansteckung auf, ist aber meist für das Endstadium der anderen Pestformen typisch. Oft geht sie mit massiven Blutungen in die Haut einher. Unbehandelt hat das Opfer praktisch keine Überlebenschance.

Bei der Therapie sucht man die Bakterien mit Antibiotika zu bekämpfen, allerdings gibt es bereits mehrfach-resistente Stämme. Wer überlebt, bleibt lange immun. Ein Impfstoff gegen Beulenpest, zugelassen in den USA und Kanada, erfordert jedes halbe Jahr eine Auffrischung. Wichtig zur Vorbeugung daher: Ratten und ihre Flöhe bekämpfen sowie die kritischen Nagerpopulationen auf eventuelles Massensterben hin überwachen.



Wie die Beulenpest ohne Antibiotika verlaufen kann, dokumentiert das Krankenblatt einer Frau 1897 in Indien. Kasi Bin Haribhai, 50 Jahre alt, hatte sich seit fünf Tagen krank gefühlt. Sie starb am vierten Tag nach ihrer Aufnahme ins Hospital.

QUELLE: G. GAFFKY ET AL. (HG.), BERICHT ÜBER DIE THÄTIGKEIT DER ZUR ERFORSCHUNG DER PEST IM JAHRE 1897 NACH INDIEN ENTSANDTEN KOMMISSION, BERLIN 1898

Teilweise mag bei explosiven Ausbrüchen die Lungenpest eine Rolle gespielt haben: Eine Pestbeule ist zunächst ein geschwollener Lymphknoten nahe der Einstichstelle; verteilt sich der Erreger unter anderem in die Lunge weiter, kann er ähnlich wie Grippe per Tröpfcheninfektion ausgehustet und von einem neuen Opfer eingeatmet werden. Diese Form, die unbehandelt praktisch stets rasch tödlich verläuft, ist heute sehr viel seltener als die Beulenpest, die sich dagegen fast harmlos ausnimmt (siehe Kasten oben). In den Jahren 1347 bis 1350 dürfte die Lungenpest ebenfalls eher geringe Ausmaße erreicht haben.

Erstaunlicherweise waren, wie etwa Marchione di Coppo Stefani notiert hatte, vom schwarzen Tod mehrere Arten von Nutztieren mitbetroffen. Rinder, Esel und Schafe sind aber für die echte Pest ziemlich unempfänglich, wie Versuche um 1900 in Indien gezeigt haben: Die Tiere konnten damals nur durch aggressive Labormethoden infiziert werden; zudem verlief bei ihnen – wie bei Schweinen – die echte Pest nicht tödlich. Dies, so folgerten manche Historiker, sei ein ziemlich deutlicher Hinweis darauf, dass im 14. Jahrhundert wenigstens eine weitere Infektionskrankheit grassiert habe.

In die Diskussion gebracht wurde der Milzbrand, der vor allem von Rindern, Schafen, Schweinen und Pferden auf den Menschen übertragen werden kann. Der Erreger, *Bacillus anthracis*, verursacht in ▷

Die Pest in Europa

Der erste wohldokumentierte schwere Seuchenzug war die so genannte justinianische Pest. Sie suchte das Abendland 541 – also zur Regierungszeit des byzantinischen Kaisers Justinian I. – heim und hielt mit Unterbrechungen bis 544 an. Bis zum 8. Jahrhundert flackerte die Krankheit sowohl im Ost- wie im Weströmischen Reich immer wieder auf.

Der schwarze Tod im engeren Sinne war ein fürchterlicher Seuchenzug zwischen 1347 und 1353 von den europäischen Ländern am Mittelmeer bis Skandinavien, zum Baltikum und nach Russland. Er erfasste zudem den Nahen Osten samt der Arabischen Halbinsel und Nordafrika. Die Pest brach dann während der gesamten zweiten Jahrhunderthälfte nach kurzen Intervallen immer wieder aus.

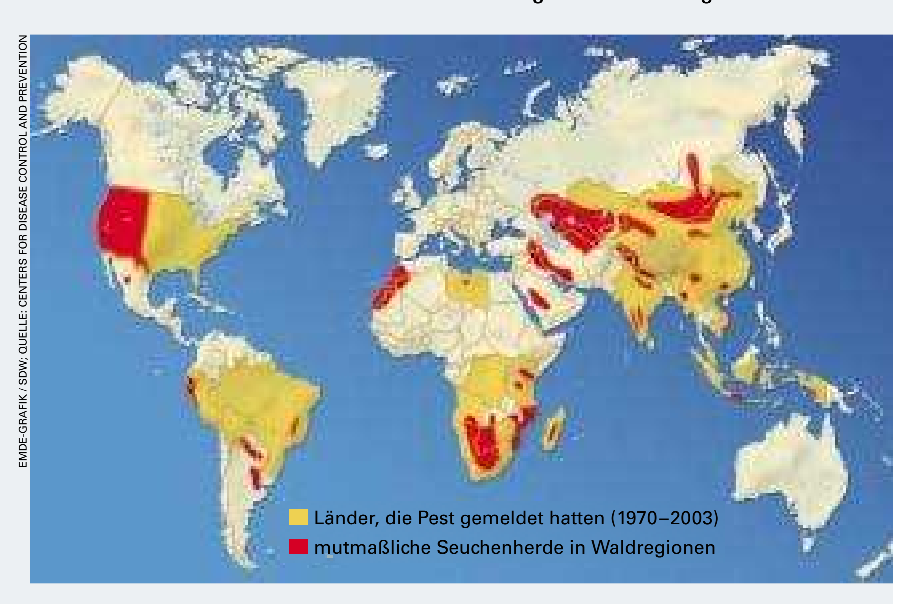
Auch später blieb sie eine der großen Volksseuchen im Abendland, gehörte beispielsweise durchaus zu den tödlichen Schrecken des Dreißigjährigen Krieges, vor allem von 1633 bis 1635. In den 150 Jahren danach erlebten hauptsächlich einige Metropolen heftige Ausbrüche. In London etwa sollen 1665/66 rund 70 000 von etwa 460 000 Einwohnern an der Pest gestorben sein. Im sehr viel kleineren Riga verloren von 1708 bis 1710 vermutlich 50 000 Menschen das Leben. In Marseille kamen von Juli bis Oktober 1720 mehr als 40 Prozent der gut 90 000 Bürger um. In Moskau starben 1771 rund 37 000 von wohl 150 000 Einwohnern.

Am Ende des Freiheitskampfs der Griechen gegen das Osmanische Reich, nach der entscheidenden Seeschlacht im Hafen von Navarino im September 1827, brach noch einmal eine Beulenpest mit Hautblutungen auf dem Peloponnes aus und verbreitete sich an den griechischen Küsten. Sie war offenbar auf ägyptischen Schiffen eingeschleppt worden, die der Sultan zur Verstärkung seiner Flotte entsandt hatte.

Bei der Pandemie um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert und ihren Nachwehen kamen zwar auch Europäer ums Leben; aber nur relativ wenige, verglichen mit der Gesamtzahl der Opfer, die auf über zehn Millionen geschätzt wurde. Gewissermaßen ein Nachspiel dieser Dramen gab es 1936 auf Malta, als 28 Bewohner der Insel erkrankten.

Viele Europäer meinen, die Pest sei heute ausgerottet. Das ist sie keineswegs. Die Weltgesundheitsorganisation registriert jährlich 1000 bis 3000 Fälle, davon durchschnittlich 10 bis 20 in den USA (Karte).

Die Pest gibt es noch immer. Ausgangspunkt sind gewöhnlich »Naturherde« (rot): wild lebende Nager und ihre Flöhe. Etliche Länder (gelb) haben in den letzten 33 Jahren Pesterkrankungen von Menschen an die Weltgesundheitsorganisation WHO gemeldet.



EMDE-GRAFIK / SDW; QUELLE: CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION

der Haut am Eintrittsort Karbunkel, kann aber auch die Lunge und den Darm befallen sowie eine so gut wie immer tödliche Sepsis verursachen. Dagegen spricht insbesondere, dass das Bakterium sicherlich nicht in wenigen Jahren Millionen Menschen zu befallen vermag.

Erst kürzlich unterbreiteten die britischen Mediziner Christopher Duncan und Susan Scott von der Universität Liverpool gar die Hypothese, das tödliche Agens sei weder *Yersinia pestis* noch sonst ein Bakterium gewesen, sondern ein mysteriöses Virus ähnlich dem Erreger des erstmals 1976 in Zentralafrika aufgetretenen Ebolafiebers, das viele Hautblutungen ausgelöst habe. Zündstoff für weitere Diskussionen.

Der Schätzwert, dem schwarzen Tod sei ein Drittel der Europäer zum Opfer gefallen, ist geradezu gebetsmühlenhaft bis in die Gegenwart wiederholt worden. Mit zu bedenken ist aber, dass die Pest gar nicht zu jeder Jahreszeit und damit während ihrer Ausbreitung nicht überall gleich verheerend gewesen sein kann, weil die beteiligten Organismen biologischen Gesetzmäßigkeiten unterliegen.

Wohl ist der Erreger selbst recht widerstandsfähig; er vermag längere Phasen ohne tierischen Wirt zu überstehen, vor allem in Erdreich oder Staub, in Sputum, Kot oder Kadavern. Auch der Überträger der Bakterien von Nagern auf Menschen, der Floh, ist zäh; doch braucht er für seine Reproduktion relativ hohe Temperaturen und genügend Luftfeuchtigkeit. Und was den Menschenfloh anbelangt, so dauert in unseren Breiten die Entwicklung von der Eiablage bis zum Schlüpfen des reifen Insekts auch im Sommer wenigstens zwanzig Tage, hingegen in der kalten Jahreszeit bis zu ein paar Monaten. Das kann erklären, warum viele lokale und regionale historische Masseninfektionen mit Pest sich jeweils im Spätherbst abschwächten; oft erloschen sie dann sogar, zumindest vorübergehend.

Gerade unter diesem Aspekt mutet merkwürdig an, dass der Krankheit in Europa – also in mittleren Breiten mit gemäßigtem Klima – um 1350 ein sehr viel höherer Anteil der Bevölkerung erlegen sein soll, als es nachweislich bei einem schlimmen Seuchenzug in den Tropen der Fall war: Während der letzten großen Pandemie um 1900 starben weniger als fünf Prozent der Bewohner Indiens – und das, obwohl dort seit je viele



Menschen unterernährt sind und auf engem Raum zusammenleben und obwohl damals schon allgemeine Mobilität mittels Eisenbahnen möglich war. Bemerkenswert ist, dass kurz nach der damals gelungenen Aufklärung des Infektionsgeschehens realistischere Überlegungen zur Mortalität historischer Ausbrüche der Pest angestellt wurden. So schrieb Johannes Nohl 1924, der schwarze Tod habe Deutschland »am wenigsten heimgesucht«, den Norden mehr als den Süden; den gesamten Bevölkerungsverlust in diesem Gebiet durch den ersten Seuchenzug, also während der Jahre 1348 bis 1350, taxierte er auf nicht mehr als ein knappes Zehntel.

Weit höhere Schätzwerte erklären sich womöglich daraus, dass krisenhafte Entwicklungen schon zuvor eingesetzt hatten. Bereits Ende des 13. Jahrhunderts begann in Europa eine wirtschaftliche Rezession infolge einer Klimaverschlechterung. Statt weiteres Land urbar zu machen, gab man Äcker und ganze Siedlungen wieder auf. Durch Missernten ausgelöste Versorgungskrisen gab es seit 1309, regelrechte Hungersnöte zwischen 1314 und 1316. Die Niederlande litten unter Überflutungen. Auf französischem Boden wurde seit 1339 der Hundertjährige Krieg ausgefochten, ausgelöst durch den Streit um den englischen Festlandsbesitz. Und das war nicht die einzige Auseinandersetzung in Europa.

Zudem kam es in den 1330er Jahren vielerorts zu einem bislang unerklärlichen Massensterben. Florenz soll Ende des Jahrzehnts mehr als 15 000 seiner auf 120 000 geschätzten Einwohner verloren haben. Auch in anderen Städten Italiens stieg die Sterblichkeit sprunghaft an, und insgesamt begann die europäische Bevölkerung deutlich zu schrumpfen.

Eine irrige Ansicht ist, die mittelalterliche Gesellschaft habe die Pest völlig hilflos über sich ergehen lassen müssen und sich deswegen exaltiertem Mystizismus wie den Geißlerumzügen hingegeben. Erfahrungen mit anderen Seuchen halfen. Als der schwarze Tod grassierte, mussten daher vielerorts die Erkrankungen gemeldet, die Befallenen isoliert und die Toten mitsamt ihren Habseligkeiten auf eigens vor den Mauern angelegten Friedhöfen begraben werden. Damals entstand auch der Begriff Quarantäne: Da die Pest auf dem Seeweg nach Venedig gekommen war, verlangte der Rat, dass Schiffe zunächst 30 Tage – *trentina* – auf Reede blieben, dann 40 Tage – *quarantina*.

Trödel als Indikator

Was die oft angeführten Judenpogrome betrifft, so sind sie keineswegs zuverlässige Hinweise auf das Auftreten der Pest, allenfalls auf die Angst vor ihr. Judenverfolgungen hatte es seit dem ersten Kreuzzug Ende des 11. Jahrhunderts gegeben. Wohl verlor Deutschland zwischen 1348 und 1352 noch einmal mehr als 300 jüdische Gemeinden. Aber das lag auch daran, dass der polnische König Kasimir III., genannt der Große, gerade 1346 ein Schutzstatut erlassen hatte, das viele Juden zur Emigration aus ihrem antisemitischen Umfeld ermutigte.

Die Erfahrung lehrt: Wo große Seuchen mit Massensterben auftraten, da lagen hinterher Felder brach, weil die Arbeitskräfte fehlten, da standen Häuser plötzlich leer, da wuchsen die Einnahmen der Kirchen für Totenläuten und für Totengräber, da wurden plötzlich viel mehr Testamente gemacht und Kleider im Trödel angeboten. Wo es das alles nicht gab, da wird man an der Pest und am Massensterben zweifeln müssen.

Mancherorts sind sogar sichere Anzeichen für das Ausbleiben der Pest oder doch eine geringe Mortalität zu finden: Wo bald nach 1350 große Kirchenbauten, gewaltige Befestigungswerke oder umfängliche Stadterweiterungen begonnen oder fortgeführt wurden, kann die Seuche kaum viele Einwohner dahingerafft haben.

Andererseits endete für weite Landstriche mit dem Durchzug des schwarzen Tods keineswegs die Phase der Entvölkerung (siehe Kasten linke Seite). In Italien etwa folgten der Pestwelle von 1347/48 nicht nur neuerliche Ausbrüche, sondern auch weitere Seuchen – vor allem Dysenterie, Typhus und Pocken. Statt wie sonst meist nach einem hohen Verlust erholte sich die Bevölkerung lange nicht.

Gerade weil der Kölner Mediävist Erich Meuthen der vielen Unwägbarkeiten wegen breite Toleranzen annahm, sind seine schon 1980 unterbreiteten Schätzwerte für Deutschland besonders plausibel. Für die Zeit um 1350 bezifferte er die Bevölkerung auf lediglich 13 bis 14 Millionen, und das Minimum wurde ihm zufolge erst gegen 1470 mit 7 bis 10 Millionen erreicht. Damals war auch der Höhepunkt der spätmittelalterlichen Wüstungsperiode erreicht, in der hauptsächlich in einem breiten Streifen von Elsass-Lothringen bis Mecklenburg und Pommern teils mehr als 50 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen brach fielen. So katastrophal die Pest Mitte des 14. Jahrhunderts auch gewesen sein mag – für die Menschen in Europa waren schon die Jahrzehnte zuvor und erst recht die danach schlimme Zeiten.

Die Streitfrage, ob vielleicht ein besonders aggressiver Pesterreger oder etwas anderes den schwarzen Tod zumindest mitverursachte, lässt sich möglicherweise einmal mit den modernen Methoden der Molekularbiologie klären – sofern es gelingt, aus den Opfern noch Reste von Erreger-DNA zu isolieren. Die historischen Quellen sind jedenfalls nicht eindeutig genug. ◁

AUTOR UND LITERATUR



Manfred Vasold arbeitet seit zwanzig Jahren als Publizist mit Schwerpunkt Medizingeschichte. Er studierte Geschichte, Politikwissenschaft und Biologie. 1978 promovierte er in Erlangen.

Die Pest. Ende eines Mythos. Von Manfred Vasold. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart 2003

The black death 1346–1353. The complete history. Von Ole J. Benedictow. Boydell Press, Woodbridge 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Lässt sich die Klima-Zeitbombe entschärfen?

Wir sind näher an der Klimakatastrophe als gemeinhin vermutet. Aber auch die Rettung könnte leichter gelingen als von vielen befürchtet – sofern existierende positive Ansätze behutsam, aber konsequent weiterverfolgt werden.

Von James E. Hansen

Am Strand von Long Island im Sommer 1976 wurde mir schlagartig bewusst, wieso die Vorstellung einer anthropogenen, also vom Menschen ausgelösten globalen Erwärmung so schwer zu begreifen ist. Gegen Mittag traf ich mit Frau und Sohn ein. Wir suchten uns einen Platz nahe am Wasser, wo der Sand nicht so glühend heiß war. Als dann die Sonne unterging, peitschte eine frische Brise das Meer auf und ließ uns frösteln.

Im selben Sommer hatte ich zusammen mit Kollegen am Goddard-Institut für Raumforschung der Nasa die Auswirkung anthropogener Emissionen auf das Klima abgeschätzt. Schon damals war bekannt, dass sich vom Menschen erzeugte Treibhausgase, speziell Kohlendioxid und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), in der Atmosphäre ansammeln. Dort wirken sie als eine Art zusätzliche Triebkraft für das Klima – Experten sprechen von »Forcing«. Wie eine Decke absorbieren sie Wärmestrahlung im infraroten Spektralbereich, die sonst von der Erdoberfläche durch die Atmosphäre hindurch in den Weltraum entweichen würde.

Unsere Gruppe hatte berechnet, dass sich dadurch die Erdoberfläche um fast zwei Watt pro Quadratmeter aufheizt. Eine elektrische Christbaumkerze gibt etwa ein Watt ab, hauptsächlich in Form von Wärme. Es war mithin so, als hätte die Menschheit zwei oder drei solche Glühbirnchen auf jeden Quadratmeter der Erdoberfläche gesetzt, wo sie seither Tag und Nacht brennen.

Das Paradoxe daran ist der Gegensatz zwischen den Furcht einflößenden Kräften der Natur und den »harmlosen« Christbaumkerzen. Die leichte Erwärmung, die sie hervorrufen, sollte doch wohl kaum über Wind und Wellen gebieten oder unser Frösteln am Strand mildern können.

Lehren aus der Erdgeschichte

Dieses scheinbare Paradox löst sich aber auf, wenn man die Klimageschichte betrachtet. Dabei zeigt sich, dass schon geringfügige Kräfte, wenn sie nur lange genug wirken, Eis- oder Warmzeiten hervorrufen können. Außerdem hat die Erde in den vergangenen Jahrzehnten bereits angefangen, sich so zu erwärmen, wie das die Klimamodelle auf Grund der Anreicherung anthropogener Treibhausgase in der Atmosphäre vorhergesagt haben. Auch die Folgen sind schon spürbar: Weltweit schwinden die Gletscher, das Treibeis der Arktis ist dünner geworden und der Frühling setzt inzwischen etwa eine Woche früher ein als noch während meiner Kindheit in den 1950er Jahren.

Dennoch bleiben viele ungeklärte Fragen. Wie stark wird sich das Klima verändern? Welche praktischen Konsequenzen hat das? Was sollten wir dagegen unternehmen? Leider ist die Debatte über diese Fragen stark durch wirtschaftliche Interessen belastet.

Eine objektive Analyse der globalen Erwärmung erfordert, drei Größen quantitativ zu erfassen: die Sensitivität des Klimasystems gegenüber äußeren Triebkräften, das Ausmaß des Forcings durch den Menschen und die Zeit, die das Klimasystem zum Reagieren braucht. All das lässt sich mit globalen Klimamodellen untersuchen, das heißt mit numerischen Simulationen am Computer. Doch die genauesten Informationen über die Klimasensitivität liefern empirische Daten aus der Erdgeschichte.

In den vergangenen ein bis zwei Millionen Jahren ist die Erde mehrfach zwischen Eiszeiten (Glazialen) und warmen



Wenn durch die globale Erwärmung die Eisdecken auf der Antarktis und Grönland zerfallen, kann der Meeresspiegel um mehrere Meter steigen, sodass viele küstennahe Tiefländer überflutet werden.

Zwischenphasen (Interglazialen) hin- und hergependelt. Aufschluss über den Temperaturverlauf in den letzten 400 000 Jahren geben Bohrkerne aus dem antarktischen Eisschild, der – abgesehen vom Küstensaum – selbst in den wärmsten Abschnitten der Zwischeneiszeiten nicht abschmolz. Nach diesen Daten sollte das derzeitige Interglazial (das so genannte Holozän), das schon etwa 12 000 Jahre andauert, seinem Ende entgegengehen.

Die langfristigen Klimaschwankungen – mit Perioden von einigen 10 000 Jahren – hängen mit langsamen Variationen der Erdbahn zusammen, die durch die Schwerkraft von anderen Planeten verursacht werden – vor allem von Jupiter und Saturn, die besonders schwer sind, sowie von der Venus, dem Schwesterplaneten der Erde. Zwar ist die mittlere jährliche Sonneneinstrahlung (Insolation) auf dem Globus davon kaum betroffen, doch ihre geografische und jahreszeitliche Verteilung schwankt um immerhin zwanzig Prozent. Dies beeinflusst auf lange Sicht die Entstehung und das Abschmelzen von Eisdecken.

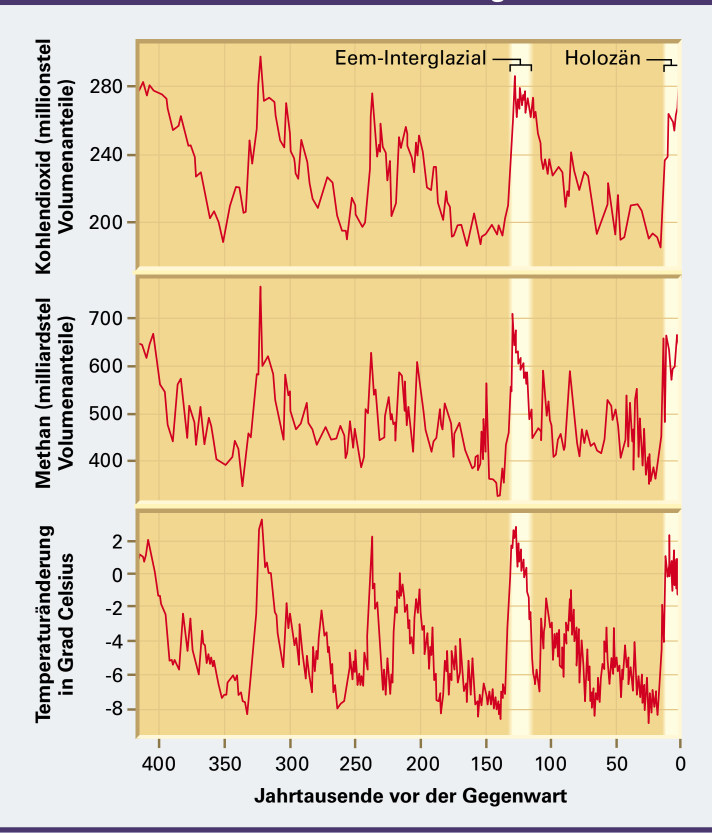
Insolation und Klimaänderungen wirken sich auch darauf aus, wie viel Kohlendioxid und Methan Pflanzen, Boden und Ozean aufnehmen oder abgeben. Klimatologen arbeiten noch an einem quantitativen Verständnis der Mechanismen, durch die Land und Meer bei einer Erwärmung der Erde Treibhausgase freisetzen. Doch schon jetzt bieten paläoklimatische Daten eine Fülle an Informationen. Vor allem lässt sich aus den Temperaturschwankungen zwischen Eis- und Zwischeneiszeiten die Klimasensitivität empirisch ermitteln.

In den Eispanzern der Antarktis und Grönlands sowie in zahlreichen Gebirgsgletschern wurden, als sie sich Jahr für Jahr durch Schneefall vergrößerten, Luftblasen eingeschlossen. Diese liefern sehr genaue Informationen über die Zusammensetzung der Atmosphäre während der letzten 400 000 Jahre. Außerdem ▷

IN KÜRZE

- Die **Erdgeschichte** belegt, dass das Klima sehr empfindlich auf Änderungen der äußeren Bedingungen reagiert.
- Getrieben durch **anthropogene Emissionen von Treibhausgasen**, Ruß und anderen klimawirksamen Stoffen, erwärmt sich die Erde so schnell, wie Klimamodelle das vorhergesagt haben.
- Die globale Mitteltemperatur darf **höchstens noch um ein Grad** steigen, bis die großen Eisdecken in Grönland und der Antarktis instabil werden und eine Überflutung der Küstengebiete weltweit droht.
- Die globale Erwärmung lässt sich durch ein Bündel international abgestimmter Maßnahmen zum Stillstand bringen, die **ohne Gefährdung der Weltwirtschaft** durchführbar sind und zusätzlichen Nutzen für die Gesundheit, die Landwirtschaft und die Umwelt bringen.

400 000 Jahre Klimageschichte



Bohrkerne aus dem antarktischen Eis geben Auskunft über die Temperatur sowie den Kohlendioxid- und Methangehalt der Atmosphäre in den vergangenen 400 000 Jahren. Dadurch können wir das derzeitige Interglazial (Holozän) mit der letzten Eiszeit, die vor 20 000 Jahren ihren Höhepunkt erreichte, und früheren Interglazialen vergleichen. Daraus lässt sich exakt bestimmen, wie empfindlich das Klima auf äußere Einflüsse reagiert. Während der letzten Zwischeneiszeit (dem Eem) lag der Meeresspiegel fünf bis sechs Meter höher als heute. Die damals herrschende Temperatur kann mithin als Richtwert dienen, der angibt, an welchem Punkt die globale Erwärmung zu einer großräumigen Überflutung küstennaher Regionen führen würde.



GRAFIKEN: JEN CHRISTIANSEN, NACH: J.R. PETIT ET AL., NATURE, JUNI 1999, VOL. 399, S. 429-436; FOTO: PHOTO RESEARCHERS INC. / CSIRO

▷ sind die geografische Verteilung der Eisflächen, die von Vegetation bedeckten Gebiete und der Verlauf der Küstenlinien für diese Zeit gut kartiert.

Dadurch wissen wir, dass die Differenz im Forcing für das Klima zwischen einer Eiszeit und heute ungefähr sechs Watt pro Quadratmeter beträgt. Dem entspricht ein weltweiter Temperaturunterschied von fünf Grad Celsius. Aus diesen beiden Größen ergibt sich eine Klimasensitivität von $0{,}75 \pm 0{,}25$ Grad Celsius pro Watt und Quadratmeter. Klimamodelle liefern einen ähnlichen Wert. Das empirische Ergebnis ist jedoch präziser und verlässlicher, weil es alle Vorgänge einschließt, die sich in der Realität abspielen – auch diejenigen, die wir noch gar nicht erkannt und in den Modellen berücksichtigt haben.

Künstliche Glasglocke

Aus den Paläodaten ergibt sich eine weitere wichtige Erkenntnis. Variationen der Erdumlaufbahn lösen Übergänge zwischen Kalt- und Warmzeiten aus, indem sie bestimmte Eigenschaften der Atmosphäre und der Erdoberfläche verändern und so die Energiebilanz des Planeten durcheinander bringen. Heute beeinflusst der Mensch diese Eigenschaften aber viel stärker, als es die Schwankungen im Orbit unseres Planeten tun.

Für die größte Veränderung des Klimaforcings in den letzten Jahrhunderten sind vom Menschen erzeugte Treibhausgase verantwortlich. Diese absorbieren die vom Boden ausgehende Infrarotstrahlung in der Atmosphäre. Dadurch bilden sie eine Art Glasglocke, die Wärme zur Erdoberfläche zurückstrahlt statt sie in den Weltraum entweichen zu lassen. Die Erde gibt dann vorübergehend weniger Energie ins All ab, als sie von der Sonne aufnimmt. Durch diese unausgeglichene Bilanz erwärmt sich unser Planet.

Wegen der großen Wärmekapazität der Ozeane geschieht das jedoch nur sehr langsam. Deshalb benötigt die Erde etwa ein Jahrhundert, bis sich schließlich auf einem höheren Temperaturniveau ein neues Gleichgewicht einstellt, bei dem der Globus wieder genauso viel Energie ins All abgibt, wie er von der Sonne erhält. In der Zwischenzeit kann sich das Forcing jedoch bereits weiter verstärkt haben.

Das wichtigste vom Menschen in die Luft geblasene Treibhausgas ist Kohlendioxid. Es stammt vorwiegend aus der Verbrennung fossiler Energieträger – Kohle, Erdöl und Erdgas. Doch die anderen anthropogenen Emissionen haben zusammen einen ähnlich großen Effekt. Dazu zählen speziell das Ozon in der Troposphäre und seine chemischen Vorstufen wie Methan und Stickoxid. Sie sind Bestandteile des Smogs, der die menschliche Gesundheit schädigt und den landwirtschaftlichen Ertrag schmälert.

Aerosole – feine Partikel in der Luft – bilden den anderen wichtigen, vom Menschen verursachten Einflussfaktor auf das Klima. Sie haben uneinheitliche und teils unklare Auswirkungen. Einige »weiße« Aerosole wie Sulfate, die sich aus dem Schwefel in fossilen Brennstoffen bilden, sind stark reflektierend und verringern daher die solare Aufheizung der Erde. Der dunkle Ruß jedoch, der bei der unvollständigen Verbrennung von Kraftstoffen und bei Bränden im Freien entsteht, absorbiert Sonnenlicht und trägt so zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Das direkte Klimaforcing durch Aerosole ist zu mindestens fünfzig Prozent ungewiss – teils wegen der Komplexität der Wirkungen dieser Schwebteilchen und teils wegen ungenauer Informationen über ihre Mengen.

Aerosole können sich aber auch indirekt auf das Klima auswirken, indem sie die Bildung hellerer, langlebigerer Wolken fördern, die mehr Sonnenlicht in den Weltraum zurückwerfen. Der indirekte Effekt von Aerosolen ist also ein negatives Forcing, das abkühlend wirkt.

Menschen beeinflussen das Klima auch, indem sie bewaldete Flächen in Ackerland überführen. Wälder sind dunkel – selbst wenn Schnee auf ihrem Boden liegt. Daher absorbieren sie mehr Sonnenlicht als Ackerland, und ihre Abholzung wirkt somit gleichfalls abkühlend.

Bei natürlichen Forcings wie Vulkanausbrüchen und Helligkeitsschwankungen der Sonne gibt es über Zeiträume von einem Jahrtausend wahrscheinlich keine systematischen Trends. Allerdings scheint die Leuchtkraft der Sonne in den letzten 150 Jahren geringfügig zugenommen zu haben, was einer Heizwirkung von einigen zehntel Watt pro Quadratmeter entspricht.

Die Summe aller genannten Forcings seit 1850 beläuft sich auf 1,6 ± 1,0 Watt pro Quadratmeter. Trotz der großen Ungewissheiten dürfte dieser Wert der Realität sehr nahe kommen. Dafür spricht die gute Übereinstimmung zwischen dem Verlauf der globalen Mitteltemperatur in den vergangenen Jahrzehnten und den Ergebnissen von Klimasimulationen auf Basis der geschilderten Triebkräfte. Insbesondere ist die in den letzten fünfzig Jahren beobachtete Wärmeaufnahme der Weltmeere mit dem geschätzten Netto-Klimaforcing vereinbar.

Die globale Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche hat seit dem Ende des 19. Jahrhunderts, dem Beginn des Zeitalters umfassender instrumenteller Messungen, um etwa 0,75 Grad Celsius zugenommen. Ein Großteil der Erwärmung, nämlich um 0,5 Grad Celsius, fand nach 1950 statt. Die Ursachen des Temperaturanstiegs lassen sich am besten für die letzten fünfzig Jahre erforschen, weil in dieser Zeit umfangreiche Daten über die meisten Klimaforcings erhoben wurden – speziell seit in den 1970er Jahren Satelliten die Sonneneinstrahlung, die Aerosole in der Stratosphäre und das bodennahe Ozon messen. Überdies fallen siebzig Prozent der vom Menschen verursachten Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre in die Zeit nach 1950.

Der wichtigste Faktor für die Entwicklung des Klimas in den nächsten Jahrzehnten ist die unausgeglichene Energiebilanz der Erde wegen der langsamen Erwärmung der Ozeane. Nach Überschlagsrechnungen befindet sie sich derzeit um 0,5 bis 1 Watt pro Quadratmeter aus dem Gleichgewicht. So viel mehr Sonnenstrahlung erreicht die Erdoberfläche gegenüber der Energiemenge, die als Wärme in den Weltraum entweicht. Dadurch werden sich die bodennahen Luftschichten um weitere 0,4 bis 0,7 Grad Celsius erwärmen, selbst wenn die Zusammensetzung der Atmosphäre von nun an unverändert bleibt.

Ozeane als Wärmepuffer

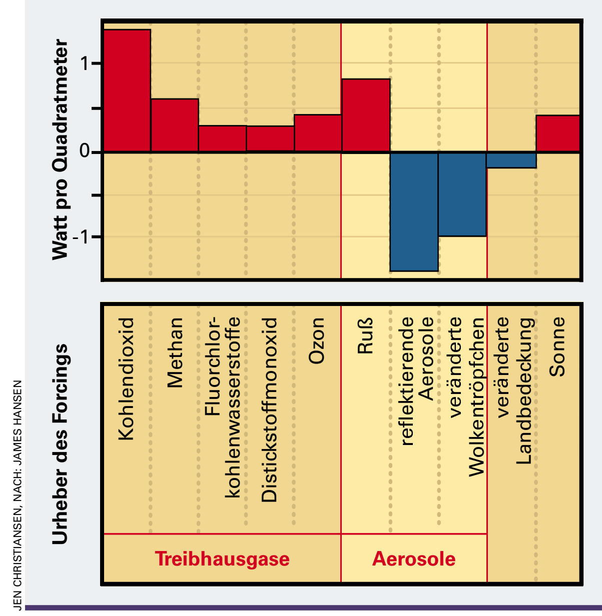
Ein Großteil der überschüssigen Sonnenenergie ist in den Ozeanen gelandet. Sydney Levitus von der National Oceanic and Atmospheric Administration der USA hat die Veränderung der Meerestemperaturen in den letzten fünfzig Jahren analysiert. Demnach ist die in den Ozeanen gespeicherte Wärmemenge in diesem Zeitraum um etwa zehn Wattjahre pro Quadratmeter gestiegen. Wie Levitus außerdem herausfand, passt die Geschwindigkeit der Wärmespeicherung in den Weltmeeren in den letzten Jahren zu der Annahme, dass sich die Erde um 0,5 bis 1 Watt pro Quadratmeter von einer ausgeglichenen Energiebilanz entfernt hat. Damit genügend Eis abtaut, um den Meeresspiegel einen Meter steigen zu lassen, müssen die Ozeane im weltweiten Durchschnitt eine Energiemenge von etwa zwölf Wattjahren pro Quadratmeter aufnehmen. Dieser Wert könnte in zwölf Jahren erreicht sein.

Offenbar stimmt also das vom Computermodell berechnete Ausmaß der Temperaturänderung und der Wärmespeicherung im Ozean mit den Beobachtungen überein. Damit steht außer Zweifel, dass der momentane Klimawandel durch anthropogene Einflüsse entscheidend mitbestimmt wird. Kritisch ist vor allem die derzeitige Geschwindigkeit der Wärmeakkumulation im Meer: Sie entscheidet nicht nur über das Ausmaß der zusätzlichen globalen Erwärmung, die bereits in Wartestellung lauert und sich nicht mehr aufhalten lässt, sondern verrät auch, um welchen Betrag wir die anthropogenen Forcings verringern müssen, damit das Erdklima nicht entgleist.

Im Jahre 1989 wurde in Rio de Janeiro die UN-Rahmenkonvention zum Klimawandel beschlossen. Das darin formulierte Ziel lautet, die Zusammensetzung der Atmosphäre zu stabilisieren, um eine »gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems zu verhindern«, und die Maßnahmen dazu so zu gestalten, dass sie die Weltwirtschaft nicht gefährden. Eine ebenso entscheidende wie schwierige Aufgabe ist es also, den Grad der Erwärmung zu definieren, der eine »gefährliche anthropogene Störung« darstellt.

Die Uno betraute einen zwischenstaatlichen Ausschuss, das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), mit der Analyse der globalen Erwärmung. Dieses hat Szenarien für Kli- ▷

Klimawirksame Faktoren



Wissenschaftler bezeichnen Einflüsse, welche die globale Energiebilanz ändern, als Forcings (Antriebe) für das Klima. Einige davon sind natürlich – periodische Variationen der Erdbahn zum Beispiel –, andere hingegen menschengemacht. Zu Letzteren zählen Treibhausgase und Aerosole. Anthropogene Klimaforcings dominieren derzeit über die natürlichen. Kohlendioxid hat den größten Einfluss, aber Luftschadstoffe wie Ruß, Ozon und Methan machen sich zusammen genauso stark bemerkbar.

▷ maforcings definiert, sie numerischen Modellen für das Klima des 21. Jahrhunderts zu Grunde gelegt und den Einfluss von Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf die Landwirtschaft, natürliche Ökosysteme, wild lebende Organismen und anderes bewertet. Demnach ist zum Beispiel mit einem Anstieg des Meeresspiegels um einige Dezimeter in hundert Jahren zu rechnen, falls die globale Erwärmung mehrere Grad Celsius erreicht. Dieser Wert beruht allein auf der thermischen Ausdehnung des Meerwassers, berücksichtigt also keine größeren Änderungen im Volumen der Eisdecken.

Die Prognosen des IPCC erwecken insgesamt den Eindruck, dass sich selbst rasch steigende Treibhausgas-Konzentrationen nur moderat auf das Klima auswirken und wir nicht unmittelbar auf eine »gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems« zusteuern. Ich werde jedoch beweisen, dass das Damoklesschwert schon viel tiefer hängt, als gemeinhin wahrgenommen wird. Deshalb halte ich es für dringend geboten, wirksame Maßnahmen zu ergreifen, um die Veränderungen abzumildern, statt nur zu versuchen, sich an sie anzupassen.

Das wesentliche Problem der weltweiten Erwärmung ist aus meiner Sicht der Anstieg des Meeresspiegels, gekoppelt mit der Frage, wie schnell Eisdecken zerfallen können. Ein Großteil der Weltbevölkerung lebt in küstennahen Tiefländern. Dort befindet sich zudem Infrastruktur im Wert von einigen Billionen Euro. Aus der Notwendigkeit, diese Regionen zu bewahren, ergibt sich eine Obergrenze der globalen Erwärmung, von der ab eine gefährliche anthropogene Störung droht.

Die Erfahrungen aus der Erdgeschichte, angewandt auf die derzeit unausgeglichene Energiebilanz des Globus, lassen für den Meeresspiegel Schlimmes befürchten. Die Chronologie des Klimas aus den antarktischen Eisbohrkernen macht deutlich, dass die globale Durchschnittstemperatur innerhalb der letzten fünfzig Jahre bereits wieder etwa das Niveau erreicht hat, das am Höhepunkt des gegenwärtigen Interglazials vor etwa 10 000 Jahren herrschte.

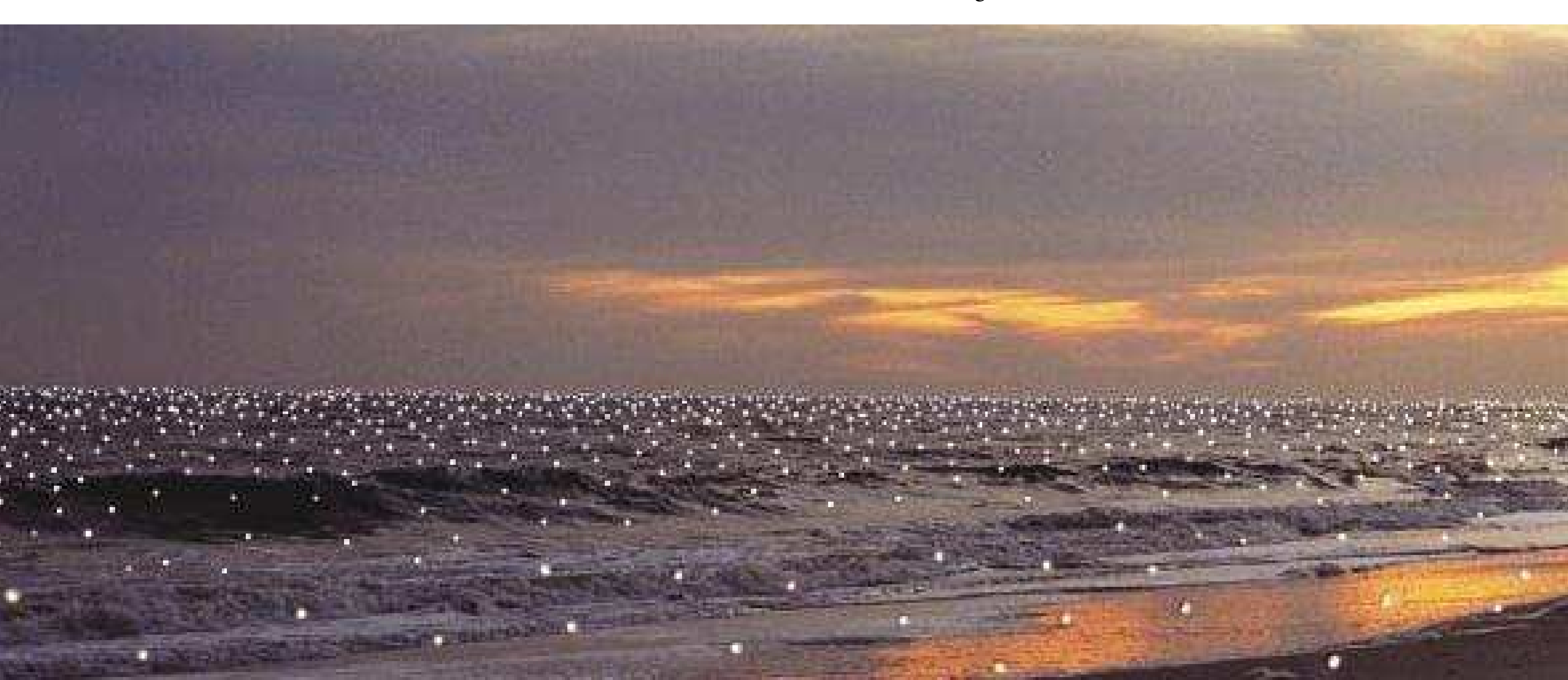
Wie stark steigt der Meeresspiegel?

Einiges an zusätzlicher Erwärmung steht uns aber noch bevor, selbst wenn der Treibhauseffekt auf dem heutigen Niveau stagnieren würde. Durch diese praktisch nicht mehr abwendbare weitere Erwärmung legen wir in den nächsten Jahrzehnten die Hälfte der Distanz bis zum höchsten globalen Temperaturniveau des vorangegangenen Interglazials (Eem) zurück, das wärmer war als das Holozän. Damals lag der Meeresspiegel schätzungsweise fünf bis sechs Meter höher als derzeit. Ein zusätzliches Forcing von einem Watt pro Quadratmeter gegenüber dem heutigen Wert dürfte die globale Temperatur ungefähr bis zum maximalen Niveau des Eems hochtreiben.

Die Gretchenfrage lautet nun: Wie schnell werden die Eisdecken auf die globale Erwärmung reagieren? Das IPCC rechnet nur mit einem leichten Schwund in den nächsten hundert Jahren; dabei berücksichtigt es jedoch lediglich die allmählichen Folgen von Veränderungen beim Schneefall, bei der Verdunstung und beim Abschmelzen. In Wirklichkeit wird der Zerfall von Eisdecken durch hochgradig nichtlineare Prozesse und Rückkopplungen gesteuert. Nach dem letzten Glazial schmolzen über einen längeren Zeitraum hinweg bis zu 14 000 Kubikkilometer Eis pro Jahr. Dadurch stieg der Meeresspiegel um etwa einen Meter in zwanzig Jahren – und das mehrere Jahrhunderte hindurch. Diese Phase des schnellsten Abschmelzens stimmte, soweit das messbar ist, mit der Zeit der raschesten Erwärmung überein.

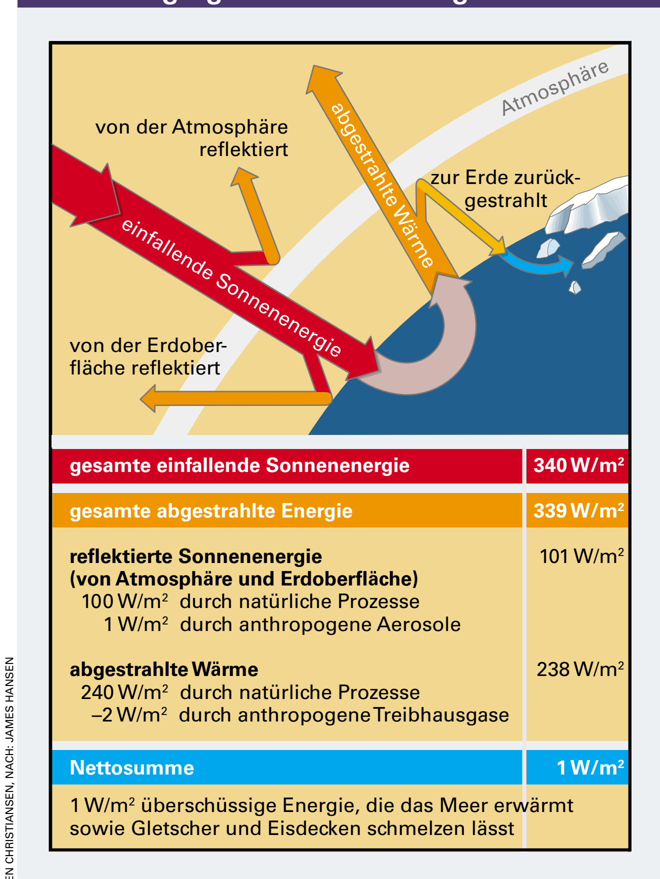
Angesichts des rasanten momentanen Temperaturanstiegs auf einem ja bereits warmen Planeten ist voraussehbar, dass sommerliche Schneeschmelze und Regen schon bald größere Bereiche von Grönland und die Ränder der Antarktis erfassen werden. Der steigende Meeresspiegel hebt das schwimmende marine Schelfeis an und löst es von Verankerungen am Meeresboden. Damit kann es den Eispanzer an Land nicht mehr abstützen, sodass dessen Rand schneller zum Ozean hin abrutscht. Zwar dauert es lange, bis sich eine Eisdecke bildet, aber sobald sie zu zerbrechen beginnt, kann sie sich atemberaubend rasch auflösen.

Die unausgeglichene Strahlungsbilanz liefert reichlich Energie für das Abtauen von Eis. Außerdem absorbieren Eisdecken, die auf Grund von Ruß-Aerosolen oder durch Schmelzwasser auf ihrer Oberfläche dunkler werden, vermehrt Sonnenlicht.



Anthropogene Klimaforcings – hauptsächlich Treibhausgase – erzeugen an der Erdoberfläche eine Wärmeleistung von knapp zwei Watt pro Quadratmeter: so viel wie zwei elektrische Christbaumkerzen.

Unausgeglichene Energiebilanz

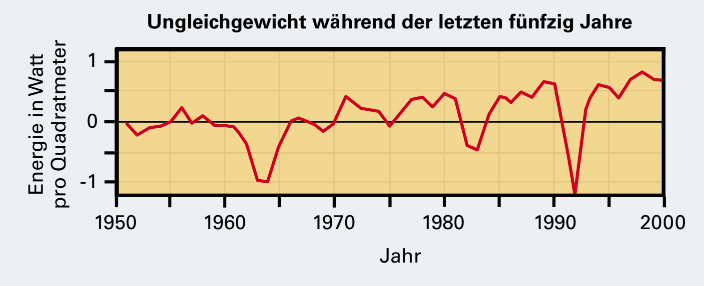


gesamte einfallende Sonnenenergie	340 W/m²
gesamte abgestrahlte Energie	339 W/m²
reflektierte Sonnenenergie (von Atmosphäre und Erdoberfläche) 100 W/m² durch natürliche Prozesse 1 W/m² durch anthropogene Aerosole	101 W/m²
abgestrahlte Wärme 240 W/m² durch natürliche Prozesse –2 W/m² durch anthropogene Treibhausgase	238 W/m²
Nettosumme	1 W/m²
1 W/m² überschüssige Energie, die das Meer erwärmt sowie Gletscher und Eisdecken schmelzen lässt	

JEN CHRISTIANSEN, NACH: JAMES HANSEN

Die Erde befindet sich im energetischen Gleichgewicht, wenn sie genauso viel Energie ins All abgibt, wie sie von der Sonne empfängt. Derzeit ist das nicht der Fall (Grafik und Tabelle links). Menschengemachte Aerosole sorgen für eine erhöhte Reflexion von Sonnenlicht, die Absorption von Wärmestrahlung durch gleichfalls menschengemachte Treibhausgase macht diesen Effekt mehr als wett.

Die überschüssige Energie – etwa ein Watt pro Quadratmeter – erwärmt die Ozeane und lässt Eismassen schmelzen. Messungen der im Meer gespeicherten Wärme bestätigen das per Computersimulation berechnete Energie-Ungleichgewicht (Diagramm unten). Dieses ist eine entscheidende Größe; denn es bestimmt das Netto-Klimaforcing und verrät, um wie viel sich die Erde noch erwärmen wird, auch wenn die Emission klimawirksamer Stoffe auf dem heutigen Niveau verharrt.

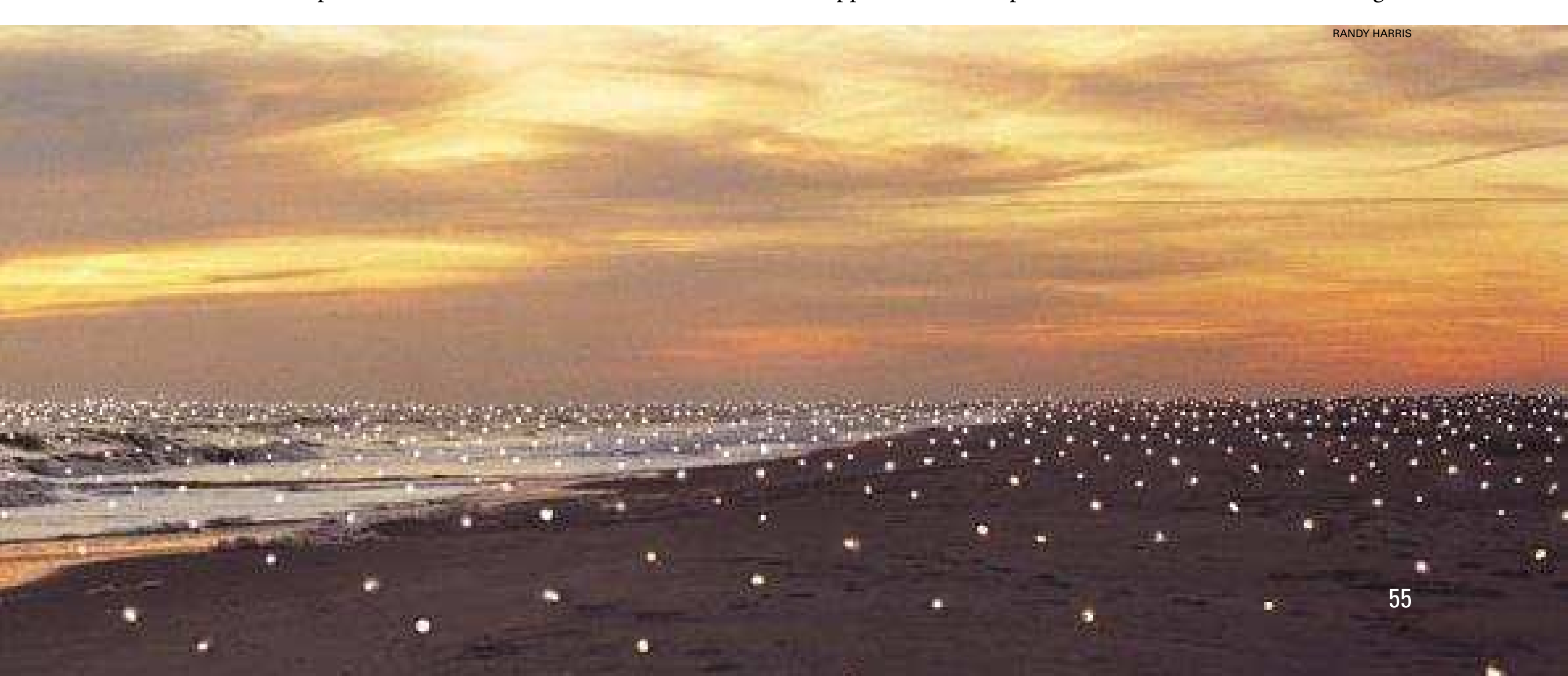


Das heißt nicht, dass schon in den nächsten Jahren mit einem starken Anstieg des Meeresspiegels zu rechnen wäre. Die Latenzzeit, in der Eisdecken äußerlich noch intakt scheinen, aber schon unaufhaltsam auf den Zerfall zusteuern, dauert vielleicht noch einige Jahrhunderte. Der Satellit IceSat, den die Nasa vor zwei Jahren ins All geschossen hat, könnte erste Anzeichen eines drohenden Zusammenbruchs aufspüren.

Ich vermute allerdings, dass es nur mehr einige Jahrzehnte dauert, bis der Meeresspiegel deutlich ansteigt, sofern die Energiebilanz des Planeten noch stärker aus dem Gleichgewicht gerät. In jedem Fall drohen künftigen Generationen, wenn die globale Erwärmung eine gewisse Grenze überschreitet, verheerende Überflutungen. Sobald ein großräumiger Zerfall von Eisdecken eingesetzt hat, ist er nicht mehr zu stoppen. Deiche mögen begrenzte Regionen wie Manhatten oder die Niederlande schützen, doch die meisten Küstengebiete der Erde werden im Meer versinken.

Wo liegt die Grenze, ab der es kein Zurück mehr gibt und eine gefährlich anthropogene Störung des Klimasystems im Sinne der Rio-Konvention unvermeidlich ist? Aus paläoklimatischen Daten schließe ich, dass wir diese Grenze spätestens dann erreichen, wenn die glo- ▷

RANDY HARRIS





▷ bale Mitteltemperatur um ein weiteres Grad Celsius steigt. Das bedeutet, dass das Klimaforcing höchstens noch um ein Watt pro Quadratmeter zunehmen darf.

Das IPCC hat diverse Szenarien für das 21. Jahrhundert durchgespielt, die auf mannigfaltigen Hochrechnungen für Bevölkerungswachstum, wirtschaftliche Entwicklung und Art der Energiegewinnung beruhen. Auf deren Basis schätzt das Gremium, dass das zusätzliche Klimaforcing in den nächsten fünfzig Jahren für Kohlendioxid allein ein bis drei und bei Berücksichtigung aller Gase und Aerosole zwei bis vier Watt pro Quadratmeter beträgt. Selbst der unterste Wert in dieser Spanne würde nach meinen Kriterien eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems auslösen.

Prognose anhand aktueller Trends

Nun könnten die Szenarien des IPCC ja allzu pessimistisch sein; denn

- sie ignorieren die Reduktion von Kohlendioxidemissionen, die aus Sorge um die globale Erwärmung zum Teil bereits eingeleitet oder sogar verwirklicht ist;
- sie unterstellen eine weitere Zunahme der Luftverschmutzung, sodass etwa die Werte für Ozon, Methan und Ruß im Jahr 2050 allesamt über denen von 2000 liegen;
- sie tragen möglichen technischen Fortschritten, durch die die Emissionen in den nächsten fünfzig Jahren sinken könnten, praktisch keine Rechnung.

Wie aber könnten alternative Szenarien aussehen? Ein vernünftiger Ansatz wäre, die gegenwärtigen Trends bei den verschiedenen auf das Klima einwirkenden Kräften zu betrachten und nach den Gründen dafür zu fragen. Im nächsten Schritt sollte man darüber nachdenken, ob und wie sich diese Trends beeinflussen lassen.

Der Anstieg des durch Treibhausgase verursachten Forcings erreichte mit fast 0,5 Watt pro Quadratmeter und Jahrzehnt in den frühen 1980er Jahren sei-

◀ **Schmelzwasser stürzt von der Eisdecke Grönlands in eine »Gletschermühle«: einen senkrechten Tunnel im Eis, durch den Oberflächenwasser bis zur Gletscherbasis gelangt. Dort beschleunigt es als Schmiermittel das Abrutschen und Zerbrechen der Eismasse.**

nen Höhepunkt, nahm in der folgenden Dekade aber auf etwa 0,3 Watt pro Quadratmeter und Jahrzehnt ab. Das lag hauptsächlich an verminderten Emissionen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), deren Produktion wegen ihrer zerstörerischen Wirkung auf die Ozonschicht in der Stratosphäre weit gehend eingestellt wurde.

Unter den verbliebenen Treibhausgasen sind Kohlendioxid und Methan die beiden wichtigsten. Die Emissionsrate von Kohlendioxid nahm vom Ende des Zweiten Weltkriegs bis Mitte der 1970er Jahre rasant zu, blieb dann bis Mitte der 1990er Jahre fast konstant und steigt seither wieder leicht an – um ungefähr 1,6 millionstel Volumenanteile im Jahr. Beim Methan sieht es sehr viel günstiger aus: Heute gelangt nur noch knapp ein Drittel der Menge in die Luft wie vor zwanzig Jahren.

Diese Zahlen hängen mit wirtschaftlichen Faktoren zusammen. So nahm der Verbrauch fossiler Brennstoffe nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs weltweit zu und ließ die entsprechenden Emissionen bis 1975 um jährlich vier Prozent steigen. Ölembargo und Preiserhöhungen in den 1970er Jahren förderten jedoch einen sparsameren Umgang mit Energie. Dadurch erhöhten sich die Emissionen in der Folgezeit nur noch um etwa ein Prozent pro Jahr. Beim Methan wirkten sich auch andere Faktoren aus, vor allem Änderungen beim Reisanbau und zunehmende Bemühungen, das Gas an Mülldeponien und im Bergbau aufzufangen. Wenn sich die jüngsten Trends bei der Emission dieser Treibhausgase fortsetzen, betrüge das resultierende Klimaforcing in den nächsten fünfzig Jahren etwa 1,5 Watt pro Quadratmeter.

Weitere Einflüsse kommen hinzu, etwa durch atmosphärisches Ozon und Aerosole. Deren Forcings werden nicht überall auf der Welt lückenlos gemessen, aber man weiß, dass sie in einigen Ländern zu- und in anderen abnehmen. Ihr Nettoeffekt ist vermutlich gering, könnte aber immerhin 0,5 Watt pro Quadratmeter erreichen. Insgesamt dürfte der vom Menschen verursachte Antrieb des Klimas in den nächsten fünfzig Jahren also um zwei Watt pro Quadratmeter zunehmen, falls sich die Emissionsraten nicht verringern.

Diese auf den gegenwärtigen Trends basierende Steigerungsrate der Klimaforcings liegt am unteren Ende der IPCC-Spanne von zwei bis vier Watt pro Quadratmeter. Der obere IPCC-Wert von vier Watt pro Quadratmeter setzt einen exponentiellen Anstieg der Kohlendioxidemissionen um jährlich vier Prozent über 50 Jahre hinweg sowie eine starke Zunahme der Luftverschmutzung voraus; diese Annahme ist jedoch sicher nicht realistisch.

Ein gangbarer Ausweg

Trotzdem übersteigt auch im Szenarium der gegenwärtigen Trends das zusätzliche Klimaforcing den kritischen Betrag von einem Watt pro Quadratmeter, den ich als derzeit besten Schätzwert dafür ansehe, ab wann ein gefährlicher anthropogener Einfluss auftritt. Aus diesem Grund halte ich eine Politik des »business as usual« für fatal.

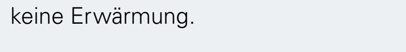
Tatsächlich besteht sehr wohl die Möglichkeit, das zusätzliche Klimaforcing in den nächsten fünfzig Jahren auf ungefähr ein Watt pro Quadratmeter zu begrenzen. Ich habe ein entsprechendes Alternativszenarium entwickelt. Es beinhaltet zwei Forderungen.

- ▶ Der Ausstoß von Luftschadstoffen – speziell von Ruß, troposphärischem Ozon und Methan – darf nicht weiter steigen, sondern sollte möglichst abnehmen.
- ▶ Die Kohlendioxidemissionen aus fossilen Brennstoffen müssen im globalen Mittel in den nächsten fünfzig Jahren auf dem heutigen Niveau bleiben.

Beide Punkte sind gleich wichtig. Ich behaupte, dass das Szenarium realistisch ist und seine Umsetzung keine negativen wirtschaftlichen Folgen hat. Zudem dienen die vorgeschlagenen Maßnahmen der menschlichen Gesundheit und nutzen der Landwirtschaft.

Bei den Luftschadstoffen sollten wir uns auf diejenigen konzentrieren, die am meisten zur globalen Erwärmung beitragen. Methan ist da einer der Hauptübeltäter. Wenn wir seine anthropogenen Quellen genügend drosseln, wäre es sogar möglich, seine Konzentration in der Atmosphäre insgesamt zu reduzieren. Der resultierende Kühleffekt könnte den Anstieg beim Kohlendioxid teilweise ausgleichen. Analog würde ein geringerer Ausstoß von Rußpartikeln dem Aufhei- ▷

Aber was ist mit ... ?



»Der letzte Winter war so kalt! Ich merke nichts von einer globalen Erwärmung!«
Die globale Erwärmung ist allgegenwärtig, beträgt bislang aber nur etwa 0,5 Grad Celsius. Die Temperatur schwankt täglich um rund fünf Grad Celsius. Selbst im saisonalen Durchschnitt beläuft sich die natürliche Schwankung zwischen verschiedenen Jahren auf rund ein Grad Celsius. Deshalb macht die globale Erwärmung nicht jede Jahreszeit wärmer als vor ein paar Jahrzehnten. Allerdings steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Jahreszeit wärmer ist als im langjährigen Durchschnitt. Sie liegt heute schon bei 60 Prozent – gegenüber 30 Prozent zwischen 1950 und 1980.

»Die derzeitige Erwärmung ist nur das normale Auftauchen aus der Kleinen Eiszeit.«
Die Kleine Eiszeit erreichte ihren Höhepunkt zwischen 1650 und 1750. Die Rückkehr zu normalen Verhältnissen war im 20. Jahrhundert also längst abgeschlossen. Wenn der langfristige natürliche Trend zum Tragen käme, müsste heute eine Abkühlung stattfinden und keine Erwärmung.

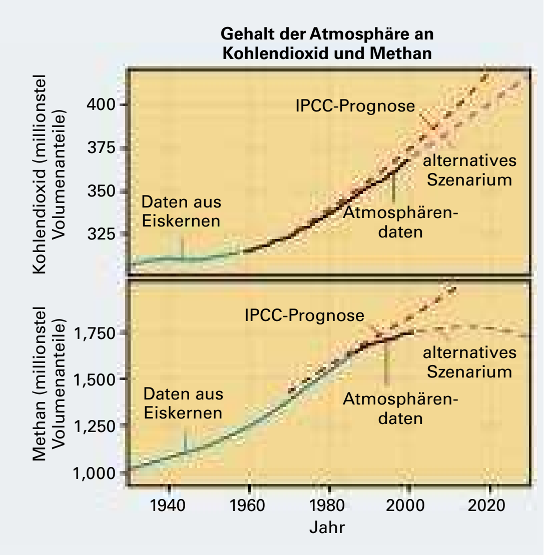
»Rettet uns die globale Erwärmung nicht vor der nächsten Eiszeit?«
Ja, aber was wir an Treibhausgasen in die Atmosphäre geblasen haben, ist schon viel mehr als genug für diesen Zweck.

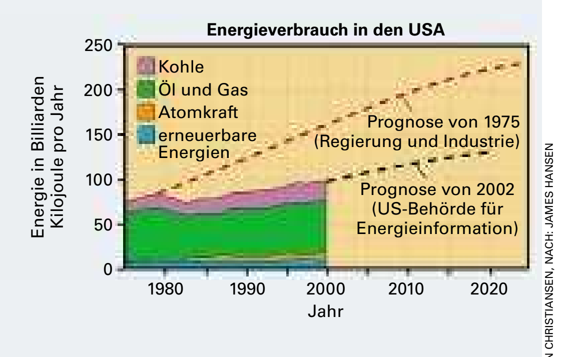
»Die globale Erwärmung wird durch städtische ›Wärmeinseln‹ rund um die Wetterstationen nur vorgetäuscht.«
Das ist Unfug. Die stärkste Erwärmung wird, wie von den Klimamodellen vorhergesagt, in entlegenen Regionen wie Zentralasien und Alaska gemessen. Die ausgedehntesten Gebiete mit erhöhter Oberflächentemperatur befinden sich über dem Ozean, weit entfernt von städtischen Ballungsräumen (siehe Karten unter www.giss.nasa.gov/data/update/gistemp). Auch Temperaturprofile im Boden, die in Hunderten von Bohrlöchern weltweit gemessen wurden, zeigen eine Erwärmung zwischen 0,5 und 1 Grad Celsius im vergangenen Jahrhundert an.

Weniger Emissionen

Die in jüngster Zeit gemessenen Emissionen von Kohlendioxid und Methan (obere zwei Grafiken) liegen unter den Schätzwerten des IPCC. Das offizielle Beratergremium der Uno in Sachen Klimaschutz ist also durchweg von zu pessimistischen Annahmen ausgegangen. Das alternative Szenarium des Autors stimmt dagegen besser mit den Beobachtungen überein.

Damit es weiterhin gültig bleibt, muss jedoch der Anstieg der Kohlendioxidemissionsrate gebremst und der Methanausstoß noch stärker als bisher verringert werden. Verbesserungen der Energieausbeute (untere Grafik) haben den Energieverbrauch in den USA in den letzten Jahrzehnten unter die vorhergesagten Werte fallen lassen. Allerdings muss der Wirkungsgrad noch schneller steigen, wenn der Kohlendioxidausstoß des alternativen Szenariums erreicht werden soll – es sei denn, Atomkraft oder erneuerbare Energien gewännen deutlich an Boden.





JEN CHRISTIANSEN, NACH: JAMES HANSEN

▷ zungseffekt durch die Verminderung der Sulfat-Aerosole entgegenwirken. Bodennahes Ozon ist der Hauptbestandteil des Smogs. Seine Bildung lässt sich vermeiden, wenn man die Emission seiner chemischen Vorstufen vermindert – vor allem flüchtige organische Verbindungen und Stickoxide.

Lässt sich die Katastrophe noch abwenden?

Methan ist ein wertvoller Brennstoff. Wenn wir seine Emission verringern, indem wir das Gas in Mülldeponien und Müllverwertungsanlagen sowie bei der Ölförderung auffangen, bringt das einen wirtschaftlichen Nutzen, der die Kosten teilweise oder manchmal sogar vollständig kompensiert. Ein verminderter Ausstoß von Rußpartikeln brächte ebenfalls wirtschaftliche Vorteile, weil sich die landwirtschaftliche Produktivität in gewissen Teilen der Welt erhöhen und der Verlust an Menschenleben und Arbeitsjahren verringern würde. Die winzig kleinen Teilchen tragen nämlich giftige organische Verbindungen und Metalle tief in die Lunge hinein und sind deshalb gesundheitsschädlich.

Wichtigste Quellen für Ruß sind Diesel- und Biokraftstoffe. Sie zu stopfen scheint deshalb schon allein aus gesundheitlichen Gründen geboten. Diesel ließe sich mit verbesserten technischen Verfahren sauberer verbrennen und Ruß durch Filter zurückhalten. Eine noch elegantere Lösung wäre zum Beispiel, Wasserstoff als Kraftstoff zu verwenden. Dadurch würden sowohl der Ruß als auch die Vorstufen des Ozons eliminiert.

Höhere Energieausbeuten und der vermehrte Einsatz erneuerbarer Energien dürften in naher Zukunft dafür sorgen, dass sich die Kohlendioxidemissionen auf einen konstanten Wert einpendeln. Ihre langfristige Reduktion ist dagegen schwieriger, weil der weltweite Energieverbrauch weiter steigen wird.

An allen Fronten müssen deshalb Fortschritte erzielt werden. Es gilt, den Wirkungsgrad stetig weiter zu verbessern, vermehrt erneuerbare Energien einzusetzen und neue Technologien zu entwickeln, bei denen wenig oder kein Kohlendioxid entsteht oder das Gas aufgefangen und abgeschieden wird. Die Atomkraft der nächsten Generation könnte, sofern sie für die Öffentlichkeit akzeptabel ist, einen bedeutenden Beitrag leisten. Außerdem gibt es bis 2050 womöglich neue Technologien, die wir uns heute noch nicht vorstellen können.

Bei den globalen Trends für Kohlendioxid und Methan sind die wirklichen Werte in den letzten Jahren unter die Prognosen aller IPCC-Szenarien gesunken. Noch ist unklar, ob es sich dabei nur um Zufallsschwankungen oder echte langfristige Abweichungen handelt. Dagegen sind die Vorhersagen meines Szenariums eingetroffen – jedenfalls in den vier Jahren, seit ich es entworfen habe. Das ist nicht verwunderlich, weil ich die jüngsten Trends ja bereits berücksichtigt habe. Ohne konzertierte Bemühungen, die anthropogenen Klimaforcings zu reduzieren, wird aber auch mein Szenarium auf längere Sicht zu Makulatur.

Woher kommt mein Optimismus trotz der Erkenntnis, dass sich das Klima näher am Rand einer Katastrophe befindet, als bislang vermutet? Hoffnungsvoll stimmt mich vor allem der Vergleich der heutigen Situation mit der vor zehn bis fünfzehn Jahren. Die wichtigsten Voraussetzungen zum Stoppen des Klimawandels wurden demnach bereits geschaffen. Sicher wird es nicht leicht sein, die Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre zu stabilisieren. Dennoch bin ich zuversichtlich, weil sich nach meiner festen Überzeugung die empirischen Beweise für den Klimawandel und seine Folgen weiter häufen werden, sodass Öffentlichkeit, Verbände, Industrie und Regierungen nicht länger darüber hinwegsehen können. Die Frage ist nur: Werden wir schnell genug handeln? ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



James E. Hansen ist Direktor des Goddard-Instituts für Weltraumforschung der Nasa und Professor am Earth Institute der Columbia-Universität in New York. Er hat unter James Van Allen an der Universität von Iowa studiert und in Physik und Astronomie promoviert.

Soot climate forcing via snow and ice albedos. Von J. E. Hansen und L. Nazarenko in: Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 101, S. 423; 13.1.2004

Climate simulations for 1951–2050 with a coupled atmosphere-ocean model. Von S. Sun und J. E. Hansen in: Journal of Climate, Bd. 16, S. 2807; 1.9.2003

Anthropogenic warming of earth's climate system. Von S. Levitus et al. in: Science, Bd. 292, S. 267; 13.4.2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Verlässlichkeit von Zeugenaussagen

Neue, psychologisch fundierte Methoden helfen den polizeilichen Ermittlern, die Glaubwürdigkeit von Tatzeugen einzuschätzen und die Genauigkeit ihrer Aussagen zu erhöhen.

Von Jacques Py und Samuel Demarchi

Der Fall Kirk Bloodsworth hat Kriminalgeschichte gemacht. Der Seemann und ehemalige Marinesoldat wurde 1985 von einem Schwurgericht in Maryland für schuldig befunden, ein neunjähriges Mädchen vergewaltigt und ermordet zu haben, und zum Tode verurteilt. In einem Berufungsverfahren zwei Jahre später wurde die Strafe auf zweimal lebenslänglich herabgesetzt. Erst 1993 wurde durch eine – inzwischen technisch mögliche – DNA-Analyse bewiesen, dass Bloodsworth nicht der Vergewaltiger sein konnte, und dieser daraufhin auf freien Fuß gesetzt. Damit ist er der erste Mensch, dem eine DNA-Analyse wenn schon nicht das Leben gerettet, so doch immerhin die Freiheit wiedergegeben hat.

Wie aber konnte es zu einem solch krassen Fehlurteil kommen? Während des Prozesses hatten die Ermittlungsbeamten keinen einzigen Sachbeweis vorzubringen: keine Fingerabdrücke, keine Blutspuren, keine Tatwaffe. Aber immerhin fünf Zeugen, darunter zwei Kinder, gaben übereinstimmend an, in Bloodsworth den Mann wiederzuerkennen, den sie zur Tatzeit in der Nähe des Tatorts gesehen hatten. Angesichts solcher Einmütigkeit sprachen ihn die Geschworenen schuldig.

Bloodsworths Schicksal ist extrem, aber kein Einzelfall. Einer US-amerikanischen Studie zufolge beruhen 90 Prozent aller (erkannten) Justizirrtümer auf einer Fehlidentifizierung, letztlich also auf einer Zeugenaussage. Dieser bekannten Schwäche zum Trotz zählen Zeugenaussagen nach wie vor zu den wichtigsten Beweismitteln in Strafverfahren.

Damit stellt sich die schwierige Frage, wie solche Informationen zu gewinnen und zu bewerten sind. Dafür nimmt die Justiz seit den 1970er Jahren die experimentelle Psychologie zu Hilfe. Ab 1974 untersuchten die Psychologin Elizabeth Loftus und ihre Mitarbeiter an der Universität Stanford (Kalifornien) verzerrende Einflüsse auf das Erinnerungsvermögen von Augenzeugen (Spektrum der Wissenschaft 1/1998, S. 62). Unsere eigenen Forschungen zum selben Thema konzentrieren sich auf Eigenschaften des Ereignisses selbst wie die Dauer und die Lichtverhältnisse, die Person des Zeugen, insbesondere sein Alter und sein Auftreten, und das Verfahren zur Gewinnung der Aussage. Dank dieser Erkenntnisse können wir heute die Verlässlichkeit von Zeugenaussagen genauer einschätzen und verbessern, sei es ein Bericht über den Tathergang, eine Täterbeschreibung oder die Identifizierung des Täters.

Letztere ist ein entscheidender Schritt in einem Ermittlungsverfahren: Erkennt der Zeuge den Täter wieder? Bei der klassischen (Simultan-)Gegenüberstellung stellt die Polizei den Verdächtigen in eine Reihe mit mehreren Vergleichspersonen, die mit der Tat nichts zu tun haben (Bild oben). Der Zeuge mustert die angetretenen Personen eingehend – durch einen Einwegspiegel, damit jede Beeinflussung oder Einschüchterung unmöglich ist – und soll angeben, ob er unter ihnen den Täter wiedererkennt.

Auf die Bitte eines kanadischen Anwalts, dessen Mandant bei einer solchen Gegenüberstellung als Täter identifiziert worden war, entwickelten in den 1970er Jahren die beiden Rechtspsychologen Anthony Doob und Hershi Kirshenbaum von der Universität Toronto eine Bewertungsmethode für die Zuverlässigkeit dieses Verfahrens, die inzwischen als Doob-Kirshenbaum-Test bekannt ist.

Dabei gingen sie von folgender Überlegung aus: Ein Zeuge, der über präzise Erinnerungen verfügt, ist unpro-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

blematisch. Wenn seine Erinnerung aber so undeutlich ist, dass er nicht zwischen dem Täter und anderen, ihm ähnlichen Personen unterscheiden kann, neigt er dazu, von den aufgestellten Personen diejenige auszuwählen, die seiner Erinnerung am ehesten entspricht, und dabei möglicherweise einen Irrtum zu begehen. Um dieser Tendenz entgegenzuwirken, bittet man den Zeugen, vorab eine Täterbeschreibung abzugeben. Eine gerichtsverwertbare Gegenüberstellung muss dann neben dem Verdächtigen wenigstens fünf und höchstens acht Vergleichspersonen enthalten, die der Beschreibung des Zeugen ebenso entsprechen wie der Verdächtige.

Pseudozeugen

Der Doob-Kirshenbaum-Test besteht nun darin, dass man Probanden ohne Fallkenntnisse (*mock witnesses*, »Pseudozeugen«) die schriftliche Zeugenbeschreibung des Verdächtigen sowie Fotos der aufgereihten Vergleichspersonen vorlegt und sie bittet, die Person zu benennen, auf welche die Beschreibung am ehesten zutrifft. Ist die Aufstellung verlässlich (und damit gerichtsverwertbar), wird der Verdächtige annähernd so häufig gewählt wie jede Vergleichsperson. Bezeichnen dagegen die Probanden durchgängig den Verdächtigen häufiger, als dem Zufall entspricht, weist die Aufstellung eine Verzerrung auf: Die Vergleichspersonen passen nicht gut genug zur Beschreibung und können damit einen in Verdacht geratenen Unschuldigen nicht in ausreichendem Maße vor einer Fehlidentifizierung bewahren. Er springt sozusagen jedem Betrachter ins Auge, ganz besonders einem Zeugen mit lückenhaftem Gedächtnis.

In einer Studie, die wir gemeinsam mit dem Forschungs- und Fortbildungszentrum der französischen Polizei (*Centre national d'étude et de formation de la Police nationale*) durchführten, überprüften wir Gegenüberstellungen aus abgeschlossenen Prozessen auf diesen Verzerrungsfaktor. Das Ergebnis war erschreckend: Mehr als 79 Prozent der Gegenüberstellungen haben den Doob-Kirshenbaum-Test nicht bestanden.

Gibt es weitere Verzerrungsfaktoren? Nehmen wir eine Gegenüberstellung, bei der die Vergleichspersonen korrekt, das heißt nach den Kriterien von Doob und Kirshenbaum, ausgewählt wurden. Gibt es dann über die Erinnerung des Zeugen hinaus irgendetwas, das den Verdächtigen von den Vergleichspersonen abhebt und damit den Zeugen zu einer Fehlidentifizierung verleiten könnte? Diese Frage lässt sich empirisch beantworten. Wir führten unser Experiment ein zweites Mal durch, gaben jedoch unseren Pseudozeugen diesmal keine Täterbeschreibung.

Diese Gegenüberstellung aus dem Film »Die üblichen Verdächtigen« von Bryan Singer (1995) erfüllt nicht die Kriterien für Verlässlichkeit. Dazu müssten die Personen in gleichem Abstand stehen und derselben Personenbeschreibung entsprechen; hier jedoch unterscheiden sie sich in der Größe, und manche tragen einen Bart, andere nicht.

Auf Fotos von dreißig Gegenüberstellungen aus abgeschlossenen Strafprozessen erkannten die Probanden in 54 Prozent der Fälle den Beschuldigten. Dieses verblüffende Ergebnis ist sicher nicht dadurch zu erklären, dass man einen Kriminellen an seiner »Verbrechervisage« erkennt; die abstruse Theorie des italienischen Mediziners und Begründers der Kriminologie Cesare Lombroso (1836–1909), wonach der »geborene Verbrecher« an erblichen Merkmalen in ▷



Diesen Verdächtigen erkennt der (europäische) Zeuge nur an seiner Nervosität und belastet damit möglicherweise einen Unschuldigen; denn Japaner auseinander zu halten fällt ihm schwer.

seiner Körpergestalt erkennbar sei, ist schon widerlegt.

Vielmehr erkennen die Probanden den Verdächtigen deshalb so leicht, weil er sich tatsächlich von den anderen Personen unterscheidet: Er steht häufiger in der Mitte der Reihe, als wenn er nach dem Zufallsprinzip platziert würde; gerade diesem Platz wenden Zeugen die meiste Aufmerksamkeit zu. Oder er zeigt eine andere Körperhaltung als die Vergleichspersonen. Oder man sieht ihm an, dass er als Einziger unter Stress steht – was auf einen zu Unrecht Beschuldigten in besonderem Maße zutrifft.

Rechnet man all diese Verzerrungsfaktoren zusammen, so ergibt sich, dass sie in praktisch allen simultanen Gegenüberstellungen (92 Prozent) wirksam sind. Das heißt nicht, dass sie jedes Mal zu einem Irrtum oder gar einem Fehlurteil führen. Die Identifizierung ist ja nur eines unter mehreren Beweismitteln. Aber ihr Beweiswert wird durch die Verzerrungsfaktoren erheblich geschwächt.

(Teilweise Abhilfe kann hier ein sequenzielles Verfahren schaffen. Der Zeuge sieht die Vergleichspersonen und den Verdächtigen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander – leibhaftig, auf Fotos oder in Videosequenzen – und muss jedes Mal entscheiden, ob es sich um den Täter handelt oder nicht. Er vergleicht also alle Präsentierten mit seinem Gedächtnisbild und nicht miteinander. Studien zufolge zeigt der Zeuge bei beiden Verfahren annähernd gleich häufig auf den richtigen Täter, wenn er sich unter den präsentierten Personen befindet. Ist das jedoch nicht der Fall, gibt es beim simultanen Verfahren bis zu 43 Prozent falsche Identifizierungen, bei sequenziellen Verfahren weniger als 20 Prozent. Simultane Gegenüberstellungen gelten in der Polizeipraxis heute als veraltet. *Die Redaktion*)

In weiteren Experimenten wurde nicht nur der Einfluss der Vergleichspersonen untersucht, sondern auch der des Ermittlungsbeamten, der die Gegenüberstellung durchführt. In einer Studie sahen zwei Gruppen von Studenten zunächst einen Film, in dem eine Straftat begangen wurde. Danach sollten sie unter sechs Fotografien von verschiedenen Personen den Täter im Film herausfinden. In der ersten Gruppe veränderte der Versuchsleiter kaum merklich sein Verhalten, wenn der Student das Foto des »Täters« betrachtete; beispielsweise lächelte er, neigte sich zu dem Zeugen hin oder nahm Blickkontakt auf. In der zweiten Gruppe bewahrte er eine neutrale Haltung. Das Ergebnis: 23 Prozent der Studenten der ersten Gruppe erkannten den Täter wieder, aber nur 5 Prozent der zweiten. Das Verhalten des Ermittlers übt demnach einen nicht zu unterschätzenden und obendrein nicht wahrnehmbaren Einfluss aus: Keiner der Probanden bemerkte die Manipulation.

»Diese Japaner sehen doch alle gleich aus«

Auch die dem Zeugen erteilte Anweisung beeinflusst die Ergebnisse. Um keine falsche Identifizierung zu provozieren, muss man deutlich machen, dass es ihm freisteht, mit »Ich weiß es nicht« zu antworten, und dass der echte Täter nicht unbedingt in der Reihe steht. Dadurch verringert sich das Risiko, einen Unschuldigen zu belasten, wohingegen ein Zeuge, der sich genau an den Täter erinnert, sich nicht davon beirren lässt.

Eine völlig verzerrungsfreie Gegenüberstellung durchzuführen ist praktisch unmöglich: Man kann weder von einem Verdächtigen, der unter Anspannung steht, eine ungezwungene Haltung erwarten noch von einem Ermittler, dass er seine ihm selbst nicht bewussten nonverbalen Signale unter Kontrolle hat. Aber dennoch: Eine Gegenüberstellung gewinnt wesentlich an Beweiswert, wenn gewisse Regeln eingehalten werden.

Andere Verzerrungsfaktoren hängen mit der Person des Zeugen zusammen. Ein Europäer, der nie in Japan gelebt hat, kann zwei Japaner schlechter auseinander halten als zwei eigene Landsleute, und umgekehrt. Dieser allgemein bekannte Effekt wird noch verstärkt, wenn der Mensch Vorurteile gegenüber Angehörigen der anderen Volksgruppe hat. John Brigham von der Staatsuniversität von Florida in Tallahassee hat diese Einflussgrößen seit 1989 in zahlreichen Studien genau erforscht und quantifiziert.

Wir selbst legten Probanden einen Fragebogen vor, um das Ausmaß ihrer Voreingenommenheit gegenüber verschiedenen Ethnien zu bestimmen. Dann führten wir Wiedererkennungsexperimente mit ihnen durch; die vorgelegten Bilder zeigten einmal Personen ihrer eigenen Ethnie, dann solche einer fremden. In letzterem Fall irrten sich die Probanden umso häufiger, je ausgeprägter ihre Vorurteile waren.

Dieser ethnische Faktor ist der einzige, der die Wiedererkennungsqualität beeinflusst. Auf das Geschlecht kommt es nicht an: In verschiedenen Studien stellten sich die Zeugenaussagen von Männern als ebenso verlässlich heraus wie die von Frauen. Die Intelligenz spielt keine Rolle, ebenso wenig das Alter. Kinder erzielen ähnliche Leistungen wie Erwachsene, vorausgesetzt, der Täter befindet sich tatsächlich unter den Vergleichspersonen. Wenn das nicht der Fall ist und der Ermittler nicht ausdrücklich betont, dass die Antwort »Ich weiß nicht« zulässig ist, begehen Kinder mehr Irrtümer, weil sie Autoritätspersonen unbedingt eine Antwort geben wollen, und sei es eine falsche.

Auch auf die Persönlichkeit des Zeugen kommt es nicht an. Wer vor der Gegenüberstellung selbstbewusst mit seinem untrüglichen Gedächtnis für Gesichter prahlt, liefert im Durchschnitt keine besseren Ergebnisse als derjenige, der sein Gedächtnis für schwach hält. Dagegen ist die nach der Gegenüberstellung geäußerte Sicherheit durchaus ein Indikator, vor allem, wenn die Identifizierung rasch und spontan erfolgte.

Hat ein Zeuge die Tat direkt miterlebt, so wird der Ermittler den Zeugen als Erstes auffordern, frei zu erzählen, was er gesehen hat. Häufig fallen diese Berichte aber zu knapp aus, insbesondere bei Kindern, alten Menschen, weniger Intelligenten oder unter Schock stehenden Opfern. Daher folgt im Anschluss meist gezieltes Befragen: das Verhör. Da

die dabei angewandten Methoden das Ergebnis nicht unwesentlich beeinflussen, entwickelten Edward Geiselman und seine Mitarbeiter von der Universität von Kalifornien in Los Angeles in den 1980er Jahren eine Alternativmethode zum klassischen Verhör.

Das kognitive Interview

Das Verfahren, das als »kognitives Interview« bekannt ist, folgt den Prinzipien des in der Psychotherapie praktizierten nichtdirektiven Gesprächs: den Bericht des Zeugen niemals unterbrechen, da sonst zahlreiche Informationen verloren gehen können; ihm nach jeder Frage Zeit lassen; in der Reihenfolge der Fragen so weit wie möglich dem (zumeist chronologischen) Gedankengang des Zeugen folgen; negativ formulierte Fragen wie »Sie haben ihn nicht gesehen?« vermeiden, da sie zur Verneinung verleiten; ganz allgemein Suggestivfragen wie »Die Ampel war rot, nicht wahr?« unterlassen. Solche Formulierungen führen Elemente ein, die der Zeuge selbst noch nicht angesprochen hat, und greifen lenkend in seine Schilderung ein. Studien zufolge sind Kinder unter sechs Jahren besonders anfällig für Suggestivfragen, ebenso ältere oder geistig minderbemittelte Menschen. Beachtet man dagegen die Regeln des nichtdirektiven Gesprächs, werden ihre Aussagen so präzise wie die eines Durchschnittserwachsenen.

Darüber hinaus arbeitet das kognitive Interview mit Gedächtnisstrategien, die diejenigen, die der Zeuge spontan anwendet, ergänzen. Nach einem Modell des menschlichen Gedächtnisses, das der kanadische Psychologe Endel Tulving 1983 veröffentlicht hat, sind die Erinnerungen eines Menschen an persönlich Erlebtes im episodischen Gedächtnis gespeichert (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 52), aber nicht ohne weiteres zugänglich. Um sie abzurufen, braucht der Mensch Erinnerungshilfen aus dem Kontext des Ereignisses. Deswegen bittet man im kognitiven Interview den Zeugen zunächst, alles zu berichten, was ihm in den Sinn kommt, auch Unsicheres uznd scheinbar Belangloses. Wie bereits erwähnt, besteht kein Zusammenhang zwischen der subjektiven Sicherheit und der Korrektheit des Mitgeteilten, weshalb keine Information unbeachtet bleiben darf, nur weil sich der Zeuge ihrer nicht sicher ist.

Zweitens ermutigt man den zu Vernehmenden, sich die Situation samt der Umgebung und den eigenen Empfindungen zum Zeitpunkt des Vorfalls zu vergegenwärtigen. Diese Strategien erbringen bereits ein Mehr an Informationen, ohne deren Qualität zu beeinträchtigen; sie sind auch bei kleinen Kindern anwendbar. Drittens bittet man den Zeugen, die Fakten rückwärts, vom Ende der Tat her, Revue passieren zu lassen. Dabei kommen zuweilen ungewöhnliche Details zum Vorschein; sehr kleine Kinder sind allerdings für ein derartiges Verfahren noch zu unreif.

Wir haben das kognitive Interview an die in Frankreich übliche Vorgehensweise angepasst und weiterentwickelt. Statt den Zeugen die Geschichte rückwärts erzählen zu lassen, bitten wir ihn, seinen Bericht in chronologischer Abfolge nochmals zu wiederholen, aber diesmal unter Konzentration auf bislang unerwähnte Einzelheiten. Erfahrungsgemäß wird nämlich der Zeuge bei seiner ▷

▷ ersten Schilderung vom Ablauf der Ereignisse so mitgerissen, dass er sich nicht davon freimachen kann und auch Details, die ihm geistig präsent sind, nicht erwähnt. Durch das nachträgliche freie, auf »Nebensächlichkeiten« gerichtete Erinnern gewinnt er wieder Zugriff darauf.

Wir testeten diese Methode, indem wir unseren Probanden zunächst einen Film von einer Straftat vorführten. Danach fragten wir sie, was sie gesehen hatten. Und zwar forderten wir die Hälfte von ihnen lediglich auf, so vollständig und präzise wie möglich zu berichten. Mit der anderen Hälfte führten wir ein kognitives Interview durch. Bei annähernd gleicher Qualität lieferte das kognitive Interview im Mittel 30 Prozent mehr Information.

Des Weiteren untersuchten wir die Effizienz des kognitiven Interviews im Polizeialltag. Dazu ließen wir in dieser Methode geschulte Polizeibeamte Zeugen aus ungelösten Fällen nochmals vernehmen. Dieser Versuch ergab keine so klaren Ergebnisse, weil von den ursprünglichen Vernehmungen keine geeigneten Aufzeichnungen existierten; wir mussten uns darauf beschränken, die Vernehmungsprotokolle zu vergleichen. Immerhin ergab sich, dass die nach dem kognitiven Interview angefertigten Niederschriften zusätzliche Informationen enthielten.

»Beschreiben Sie das Gesicht von unten nach oben«

Zugleich beweisen diese Studien, dass sich die Methode in die Vernehmungspraxis integrieren lässt. Anderen Arbeiten zufolge erhöht das kognitive Interview nicht nur die Informationsmenge, sondern verringert auch die Suggestiveffekte des üblichen Vernehmungsverfahrens. Offenbar kann es sogar dem Vergessen Einhalt gebieten, denn die Erinnerungsleistungen waren nach einem Zeitraum von mehreren Wochen nicht schlechter als unmitttelbar nach dem Abspielen des Films – im Gegensatz zu den klassischen Verfahren.

Eine Beschreibung des Täters in Worten spielt in den Ermittlungen eine entscheidende Rolle. Entgegen der verbreiteten Vorstellung trägt sie ebenso viel zur Ergreifung des Gesuchten bei wie ein Phantombild durchschnittlicher Qualität. Eine einschlägige Untersuchung stammt von Hadyn Ellis und seinen Mitarbeitern von der Universität Cardiff (Großbritannien). Sie legten zunächst Studenten jeweils ein Foto von einem Gesicht vor. Das sollten sie sich eine Minute lang einprägen, anschließend aus dem Gedächtnis in Worten beschreiben und dann ein Phantombild davon erstellen. Da die Experimentatoren sechs verschiedene Bilder verwendeten, gewannen sie sechs Paare von verbaler Beschreibung und Phantombild. In einem zweiten Schritt legten sie anderen Studenten einen Satz von 24 Porträts vor, in dem die sechs beschriebenen enthalten waren, und baten sie, diese sechs Gesichter herauszufinden. Eine Probandengruppe erhielt dazu die Personenbeschreibungen und eine zweite die Phantombilder. In der ersten Gruppe wurden durchschnittlich 4,8 Gesichter wiedererkannt, in der zweiten nur 2,3.

Allerdings sind Personenbeschreibungen oft dürftig. Das klassische Verfahren, den Zeugen jede Gesichtspartie (Mund, Nase, Augen, …) einzeln beschreiben zu lassen, ist von begrenztem Wert; denn auf geschlossene Fragen (»Welche Farbe hatten seine Augen?«) bekommt man häufiger falsche Antworten als auf offene: »Beschreiben Sie mir den Täter so vollständig und genau wie möglich.«

Eine andere Methode setzt an dem typischen Ablauf einer spontanen Beschreibung an. Häufig beginnt ein Zeuge mit allgemeinen Merkmalen wie Geschlecht, Größe, Alter, Statur: »Es war ein Mann, eher groß, ziemlich jung, …«. Dann folgen Angaben über das Gesicht, und zwar meist von oben nach unten, also von Haaren und Augenfarbe zur Nase; die untere Gesichtspartie (Mund und Kinn) wird fast nie erwähnt. Aus dieser Erfahrung klüger geworden, fordert man den Zeugen zunächst auf, die betreffende Person so zu beschreiben, wie es ihm spontan in den Sinn kommt, also in der Regel wie oben dargestellt. Dann aber soll er das Gesicht des Täters von unten nach oben beschreiben. Die Wirksamkeit dieses Vorgehens überprüften wir gemeinsam mit Ermittlungsbeamten in einem Experiment. Demnach erbringt dieses Verfahren im Vergleich zur klassischen Vernehmungsmethode doppelt so viele korrekte Informationen über einen Verdächtigen und halbiert zugleich die Irrtumsrate.





BEIDE: J. M. THIRIET

▲ **Grundregeln der Vernehmungskunst: Von Suggestivfragen ist abzuraten (links); dem Zeugen für die Tatschilderung Zeit lassen (rechts).**

Mit der Qualität von Augenzeugenberichten beschäftigt sich die Psychologie, seit es sie als Wissenschaft gibt, und das Thema ist heute aktueller denn je. Seit Ende der 1970er Jahre läuft auch die Entwicklung empirisch gesicherter Methoden, um diese Qualität zu steigern. Dieses relativ neue Forschungsgebiet gewinnt zunehmend an Bedeutung. Denn auf die Umstände, unter denen ein Verbrechen abläuft – rasch, bei schlechter Beleuchtung und so weiter –, hat die Polizei wenig Einfluss, dafür umso mehr auf die Methoden, mit denen sie aus Opfern und Zeugen der Tat Informationen gewinnt. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Jacques Py ist Professor für Sozialpsychologie an der Universität Paris 8 und Präsident der französischen Psychologenvereinigung *(Société française de psychologie)*. **Samuel Demarchi** ist Sozialpsychologe und hat einen Lehr- und Forschungsauftrag an der Universität Paris 8.

Les outils pour le recueil et l'évaluation des témoignages judiciaires. Von S. Demarchi, M. Ginet und J. Py in: La psychologie appliquée à l'analyse de problèmes sociaux. Von P. Pansu und C. Louche (Hg.). Presses Universitaires de France, Paris 2004

A technique for enhancing memory in eyewitness testimonies for use by police officers and judicial officials: the cognitive interview. Von M. Ginet und J. Py in: Le Travail Humain, Bd. 64, Nr. 2, S. 173, 2001

Témoins sous influences. Recherche de psychologie sociale et cognitive. Von A. Bertone, M. Melen, J. Py und A. Somat. Presses Universitaires de Grenoble, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Löcher im Raketenschild

Der Autor, Physiker und renommierter Experte für Militärtechnologie, listet die Probleme auf, mit denen die nationale Raketenabwehr der USA konfrontiert ist.



NUKEPHOTO.COM / PAUL SHAMBROOM

Von Richard L. Garwin

Lange Zeit war es still geworden um die nationale Raketenabwehr der USA. Doch hinter den Kulissen ging der Aufbau dieses ebenso ambitionierten wie umstrittenen Verteidigungssystems weiter voran. Da die US-Regierung fürchtet, so genannte Schurkenstaaten – namentlich Nordkorea oder der Iran – könnten nukleare oder biologische Waffen per Interkontinentalrakete auf das Territorium der Vereinigten Staaten abfeuern, soll der Aufbau des neu entworfenen Systems dieser Bedrohung entgegenwirken. Der alte und der neue US-Präsident George W. Bush wird wohl in Kürze die erste Phase der *national missile defense* (NMD) für einsatzbereit erklären.

Die Raketenabwehrbehörde (Missile Defense Agency, MDA) des Pentagons hat in Silos in Fort Greely (Alaska) sechs Abfangraketen installiert, die anfliegende feindliche Raketen in ihrer mittleren Flugphase treffen sollen – also dann, wenn diese ihre Startstufe bereits abgeworfen haben und antriebslos die Scheitelzone ihrer ballistischen Flugbahn erreichen. Bis

Die USA nutzten bisher modifizierte Minuteman-Raketen als Abfangwaffe, um ihr Raketenabwehrsystem zu erproben. Die Testbedingungen waren allerdings nicht realistisch.

Ende 2005 sollen 14 weitere Abfangraketen stationiert werden – zehn davon ebenfalls in Fort Greely und vier auf der Vandenberg-Luftwaffenbasis in Kalifornien. Die MDA möchte diese rudimentäre Verteidigung in den nächsten Jahren um zusätzliche Abfangraketen, hochmoderne Radaranlagen und leistungsfähige Aufklärungssatelliten ergänzen.

Seit 1985 haben die USA mehr als 80 Milliarden Dollar in die Raketenabwehr investiert. Doch trotz dieser enormen Summe wird das System noch über viele Jahre hinweg keinen nennenswerten Schutz bieten – wenn überhaupt. Der politische Druck, die US-Bevölkerung in Sicherheit zu wiegen, hat zu einem Verteidigungskonzept geführt, das nicht einmal die einfachsten Bedrohungen durch die aufstrebenden Raketenmächte abwehren kann. Das von der MDA entworfene System taugt vom Ansatz her nur für die Abwehr von Langstreckenraketen, die Tausende von Kilometern von den USA entfernt abgefeuert werden. Es ist völlig machtlos gegenüber einem Angriff von Kurz- oder Mittelstreckenraketen, die von einem Schiff vor den Küsten der Vereinigten Staaten starten. Und selbst den eigentlichen Auftrag wird das Abwehrsystem wohl nicht erfüllen, denn ein Angreifer könnte seine Interkontinentalraketen mit sehr einfachen, aber hochwirksamen Gegenmaßnahmen ausstatten.

Eine effektive Abwehr gegen ballistische Flugkörper ist durchaus erstrebenswert. Das Zerstörungspotenzial eines nuklearen Sprengkopfs ist so gewaltig, dass es unverantwortlich wäre, nicht nach Wegen zum Schutz des eigenen Territoriums zu suchen. Aber statt eilig ein fehlerhaftes System aufzubauen, sollten Rüstungsfirmen, Technikexperten und Politiker sorgfältig das jeweilige Ausmaß der Bedrohungen bewerten und die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Verteidigungsmaßnahmen abschätzen. Das Pentagon muss sich auf die unmittelbareren Gefahren konzentrieren, die von Kurz- und Mittelstreckenraketen sowie von Marschflugkörpern *(cruise missiles)* ausgehen. Die Mittel, die nun für die vom MDA vertretene Abwehr in der mittleren Flugphase aufgewandt werden, sollten für die Entwicklung eines alternativen Systems eingesetzt werden, das tatsächlich eine Chance hat, Interkontinentalraketen zu stoppen.

Raketenabwehrkonzepte lassen sich allgemein in drei Kategorien einteilen, je nachdem, ob das angreifende Geschoss in der End-, der Start- oder der mittleren Phase seiner Flugbahn zerstört werden soll. Eine Abwehr in der Endphase bedeutet, den sich nähernden Gefechtskopf auf dem letzten Stück seiner Bahnkurve zu stoppen – weniger als eine Minute vor Erreichen des Ziels. Wichtig hierbei wäre natürlich, dass der Abfangpunkt so weit vom Ziel entfernt ist, dass der Gefechtskopf dort keinen Schaden mehr anrichten kann. Deshalb ist es weitaus schwieriger, eine Stadt mitsamt ihrer Bevölkerung zu schützen als eine Batterie von speziell verbunkerten Raketensilos. Von Letzteren blieben selbst nach einer nahebei erfolgten Kernwaffenexplosion wohl noch einige intakt, um einen Gegenschlag auslösen zu können – und da der Angreifer damit rechnen müsste, würde es ihn gerade deshalb von einem Angriff abschrecken. Für den Schutz einer Metropole wie San Francisco oder Washington hingegen muss der anfliegende Gefechtskopf bereits in großer Höhe zerstört werden – und jedes Versagen des Abwehrsystems hätte katastrophale Folgen für den Angegriffenen.

Technisch alles kein Problem – aber nur in der Theorie

So müsste zum Beispiel ein 1-Megatonnen-Gefechtskopf (also einer mit der gleichen Explosionsstärke wie eine Million Tonnen des konventionellen Sprengstoffs TNT) in einer Höhe von mindestens 10 Kilometern abgefangen werden. Gelänge das nicht, würde die Hitze der Detonation die Stadt in Brand setzen. Andererseits dürfte die Abfangrakete erst dann starten, wenn der Gefechtskopf auf seiner ballistischen Bahn wieder in die Erdatmosphäre eingetreten ist, damit das Verteidigungssystem zwischen der eigentlichen (schweren) Waffe und eventuell mitgeführten (leichten) Attrappen unterscheiden kann. Diese Einschränkungen bedingen, dass die Abwehrraketen nicht weiter als 50 Kilometer von der Stadt entfernt stationiert sein dürfen. Solange also das Pentagon nicht willens ist, das Land mit einem Teppich von Abwehrraketen zu überziehen, folgt daraus, dass eine Endphasenabwehr keine angemessene Antwort auf die Bedrohung durch einige wenige nuklearbestückte Interkontinentalraketen ist. Selbst wenn zahlreiche Städte vollkommen geschützt wären, könnte ein Angreifer dieses aufwändige Verteidigungssystem unterlaufen, indem er eine der noch ungeschützten Städte als Ziel auswählte.

Eine Abwehr in der Startphase würde erfordern, die angreifende Rakete noch während ihres Aufstiegs in den ersten Minuten nach dem Start abzufangen. Diese Strategie stellt hohe Anforderungen an den Abwehrflugkörper. Eine typische Interkontinentalrakete (Intercontinental Ballistic Missile, ICBM) steigt nach dem Start bogenförmig mit einer Beschleunigung von etwa 3 g – dem Dreifachen der Erdbeschleunigung – aufwärts und erreicht nach 250 Sekunden eine Geschwindigkeit von sieben Kilometern in der Sekunde. Angenommen, die Abwehrrakete habe 200 Sekunden, um die ICBM zu erreichen (dazu müsste sie innerhalb einer Minute nach dem Start der ICBM ebenfalls aufsteigen) und müsste 500 Kilometer von ihrem Stationierungsort zur feindlichen Rakete zurücklegen. Die Abwehrrakete könnte dies schaffen, wenn sie innerhalb der ersten 100 Sekunden konstant mit 3,5 g beschleunigen – dem Dreieinhalbfachen der Erdbeschleunigung – und in den folgenden 100 Sekunden mit einer Endgeschwindigkeit von 3,33 Kilometer pro Sekunde fliegen würde. Falls die Abwehrrakete 1000 Kilometer zurücklegen müsste, wären die erforderliche Beschleunigung und Endgeschwindigkeit doppelt so hoch.

Um ICBMs, die irgendwo in Nordkorea gestartet wurden, in der Startphase abzufangen, hätten Abwehrflugkörper, die auf Schiffen vor den Küsten dieses Landes oder in seinen Nachbarstaaten stationiert sein könnten, etwa 1000 Kilometer weit zu fliegen. Dann müssten sie Endgeschwindigkeiten von sechs bis acht Kilometern in der Sekunde erreichen. Der Iran aber ist ein viel größeres Land, sodass Abwehrraketen nach 50 Sekunden Endgeschwindigkeiten von etwa zehn Kilometer pro Sekunde erreichen müssten. Dazu wäre eine durchschnittliche Beschleunigung von 20 g erforderlich. Technisch wäre das durchaus machbar; bereits in den 1960er Jahren testeten die USA eine kleine Rakete, die kurzzeitig eine Beschleunigung von 260 g erreichte.

Gelegentlich werden als alternative Abwehrwaffe luftgestützte Laser diskutiert, deren energiereiches Licht für eine ▷

▷ gewisse Zeit auf die Hülle der startenden ICBM fokussiert werden müsste. Doch solche auf Flugzeugen stationierte Laser wären extrem teuer und schwierig zu bedienen. Zudem dürfte ihre Distanz zur abzuschießenden Rakete nicht mehr als etwa 300 Kilometer betragen, um überhaupt erfolgreich sein zu können.

Die Abwehr in der Startphase wäre noch schwieriger, wenn die angreifenden Raketen auf russischem oder chinesischem Territorium gestartet würden. Diese Länder sind so groß, dass vor ihren Küsten stationierte Abwehrwaffen die ICBMs während der Startphase gar nicht erreichen könnten. Die Abfangsysteme müssten im Weltraum stationiert werden, was die Gesamtkosten um ein Vielfaches erhöhen würde.

Zwar waren solche im Weltraum stationierten Abfangraketen Bestandteil der ursprünglichen Strategischen Verteidigungsinitiative (Strategic Defense Initiative, SDI), wie sie der damalige US-Präsident Ronald Reagan vor zwei Jahrzehnten vorgeschlagen hatte. Doch konzentrierte sich das Pentagon Ende der 1990er Jahre stattdessen darauf, einen Gefechtskopf außerhalb der Atmosphäre zu zerstören, in der höchsten Phase der Flugbahn. Aus diesem Grund ist die Technologie, welche die MDA nun anwendet, die am weitesten entwickelte – aber gewiss nicht die wirksamste.

Wie würde das MDA-System funktionieren? Das erste Anzeichen für den Start einer ICBM käme von militärischen Satelliten, die speziell für die Entdeckung der heißen Abgasflamme eines großen Raketentriebwerks entwickelt wurden. Diese Satelliten des Defense Support Program (DSP), seit den 1970er Jahren im Einsatz, sind 36000 Kilometer über der Erde auf geosynchronen Umlaufbahnen stationiert. Wegen ihrer Umlaufzeit von 24 Stunden bleiben sie scheinbar fest über einem bestimmten Punkt des Äquators stehen. Zusammen beobachten diese Satelliten fast den gesamten Planeten im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums und sind daher in der Lage, den Start jedes ballistischen Flugkörpers von signifikanter Größe und Reichweite aufzuspüren. Jeder DSP-Satellit scannt alle zehn Sekunden die Oberfläche der Erde und würde mit einer Genauigkeit von etwa einem Kilometer die ungefähre Position der Rakete ermitteln – und zwar ab dem Zeitpunkt, zu dem sie die Wolkendecke in einer Höhe von etwa zehn Kilometern durchstößt, bis zum Brennschluss ihres Triebwerks etwa 200 bis 300 Sekunden später. Teile der Erdoberfläche werden durch zwei DSP-Satelliten gleichzeitig abgedeckt.

Radarstation verfolgt Flugbahnen der angreifenden Raketen

Das MDA-System ist so angelegt, dass gegen jede angreifende Rakete mehrere Abfanggeschosse abgefeuert würden, um sie in der mittleren Flugphase zu zerstören, also wenn sie ihr Triebwerk längst abgeschaltet und den nuklearen Gefechtskopf abgetrennt hat. Das Abfangen geschähe im luftleeren Weltraum, Hunderte von Kilometern oberhalb der Erdoberfläche. Das Ziel wäre der Gefechtskopf, der zum Schutz vor der starken Reibungshitze während des Wiedereintritts in die Erdatmosphäre in einer Wiedereintrittskapsel *(reentry vehicle)* eingeschlossen ist. Da Ort und Zeitpunkt des geplanten Abfangs präzise errechnet und der Abfangrakete mitgeteilt werden müssen, ist die Flugbahn des Gefechtskopfs genau zu verfolgen. Die DSP-Satelliten können eine Rakete nach dem Brennschluss ihres Triebwerks nicht mehr aufspüren; deshalb müssen Radarstationen diese Aufgabe übernehmen.

ICBMs, die aus Nordkorea kommen, würden über den Nordpazifik anfliegen. Um diesen Bereich zu überwachen, wollte das Pentagon ursprünglich auf Shemya Island an der Spitze der Aleuten-Inselkette eine moderne Radarstation errichten. Doch die starken Winde und die raue See dort hätten den Bau vor Ort erschwert. Nun lässt die MDA für 900 Millionen Dollar eine Radaranlage auf einer schwimmenden Plattform vor der texanischen Küste bauen. Nach ihrer Fertigstellung Ende 2005 wird die Anlage zu ihrem Einsatzort in der Nähe der Aleuten geschleppt. (Bis zu diesem Zeitpunkt ist das MDA-System auf das Cobra-Dane-Frühwarnradar der US-Luftwaffe auf Shemya Island angewiesen.) Das neue Radar wird Mikrowellen im so genannten X-Band senden. Mit einer Wellenlänge von etwa drei Zentimetern sind diese Wellen kürzer als diejenigen konventioneller Radaranlagen. Denn nur mit solch kurzen Wellen lässt sich der Radarstrahl genügend verengen, um einen Gefechtskopf innerhalb der »Bedrohungswolke« erkennen zu können, in der sich zusätzlich auch die letzte Raketenstufe der ICBM und vermutlich Dutzende aufblasbarer Ballonattrappen befinden, die dem Radar – sowie optischen oder Infrarotsensoren – einen Gefechtskopf vorgaukeln sollen.

Das neue X-Band-Radar in der Nähe der Aleuten wäre allerdings nutzlos, wenn eine ICBM aus dem Iran käme. Die Flugroute würde dann nämlich über Europa und den Nordatlantik führen. Diesen Schwachpunkt möchte die MDA in den nächsten Jahren durch Stationieren verbesserter Sensoren und Abfangraketen in einer größeren Reihe von Anlagen beseitigen. Letztlich soll das DSP-System durch ein neues, weltraumgestütztes Infrarotsystem ersetzt werden, mit Satelliten auf geosynchronen Umlaufbahnen, die eine genauere Verfolgung der ICBMs während ihres Aufstiegs ermöglichen. Zusätzlich entwickelt das Pentagon eine Satelliten-Konstellation in niedrigen Erdumlaufbahnen, um Raketen mittels Infrarot- und Lichtsensoren auch in ihrer mittleren Flugphase verfolgen zu können. Das Kommunikationsnetz, das Satelliten, Radaranlagen und Abfangraketen mit der unterirdischen Leitzentrale in Cheyenne Mountain in Colorada verbindet, wird ebenfalls stufenweise ausgebaut.

Frühere Ansätze zur Raketenabwehr – das von den USA Mitte der 1970er Jahre betriebene Safeguard-System zum Schutz der 150 Raketensilos in Norddakota und das immer noch betriebene rus-

IN KÜRZE

▶ Das derzeit im Aufbau befindliche **nationale Raketenabwehrsystem** der USA verfolgt ein sehr spezielles Ziel: Einzelne angreifende Interkontinentalraketen sollen in ihrer **mittleren Flugphase** abgefangen werden, während ihre Gefechtsköpfe mit hoher Geschwindigkeit oberhalb der Erdatmosphäre dahinrasen.

▶ Der größte **Schwachpunkt des Abwehrsystems** ist, dass es relativ leicht unterlaufen werden kann. So könnte ein Angreifer seine ballistische Rakete mit Dutzenden von Attrappen ausstatten, die nicht oder kaum von dem eigentlichen Gefechtskopf zu unterscheiden wären.

Der auf dem Kwajalein-Atoll im Pazifik stationierte Prototyp eines X-Band-Radars sollte während der Tests des Raketenabwehrsystems die anfliegenden Scheingefechtsköpfe aufspüren. Da sich diese Anlage für die Bahnverfolgung nur bedingt eignete, versorgten Sender auf den Gefechtsköpfen die Abwehrraketen mit zusätzlichen Positionsangaben.


NUKEPHOTO.COM / PAUL SHAMBROOM

sische Pendant zur Verteidigung Moskaus – stützten sich auf nuklear bestückte Abfangraketen, die in der Nähe des angreifenden Flugkörpers detonieren und ihn damit zerstören sollten. Doch in den letzten Jahrzehnten konnten die Lenksysteme so weit verbessert werden, dass es möglich wurde, Raketen durch direkten Zusammenprall mit Abfangflugkörpern zu zerstören. Dieses Verfahren kommt ohne Kernexplosionen im Weltall oder in der Atmosphäre aus, die Umweltschäden verursachen und Kommunikationsverbindungen unterbrechen würden.

Jede Abfangrakete des MDA-Systems trägt als Nutzlast einen Zerstörungskörper *(kill vehicle)*, der mit Hilfe von Infrarotsensoren den ICBM-Gefechtskopf anpeilt. Kleine Seitendüsen korrigieren den Anflug und bringen die Abfangrakete auf Kollisionskurs. Das Pentagon hat diese so genannte *hit-to-kill*-Fähigkeit seit 1999 in verschiedenen Tests demonstriert. Allerdings stimmt die MDA mit ihren Kritikern darin überein, dass das Verteidigungsministerium in diesen Tests keinen realistischen Angriff durch ballistische Flugkörper simulierte (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 92, und 9/2001, S. 86).

Wegen der hohen Relativgeschwindigkeit der beiden Raketen wirkt das gesamte *kill vehicle* als Projektil. Selbst ein in Ruhe befindlicher Körper, der sich dem mit 7 Kilometer pro Sekunde schnellen Gefechtskopf entgegenstellte, würde mit ungeheurer Wucht mit diesem zusammenprallen – für jedes Kilogramm Körpermasse würden fast 25 Millionen Joule an kinetischer Energie frei werden. Die Energiedichte eines hochbrisanten Sprengstoffs liegt hingegen nur bei etwa 4 Millionen Joule pro Kilogramm. Darum ist es offensichtlich nicht nötig, ein *kill vehicle* mit Explosivstoffen zu bestücken. Effizienter wäre es, Masse in Form verbesserter Lenksysteme hinzuzufügen, um nicht nur die Wucht des Aufpralls, sondern auch die Wahrscheinlichkeit eines Treffers zu steigern.

Die nationale Raketenabwehr muss sich einem Gegner stellen, der einiges aufs Spiel setzt und unsere Abwehrmaßnahmen zu überwinden sucht. Der Aufbau eines Systems, das nur dann funktioniert, wenn der Angreifer keine einfach durchzuführenden Tricks nutzt, würde eine falsche Sicherheit vorgaukeln. Eine offensichtliche Gegenmaßnahme wäre, die Radar- und Infrarotsignaturen der angreifenden Rakete und ihres Gefechtskopfs zu reduzieren, um nicht ein so gutes Ziel abzugeben. Zum Beispiel würde das Einbetten des Gefechtskopfs in eine spitzkegelig geformte Wiedereintrittskapsel, die zudem von radarabsorbierendem Material umhüllt ist, die Sichtbarkeit im X-Band-Radar erheblich reduzieren. Ein Angreifer könnte auch die dunkle Gefechtskopfhülle mit flüssigem Stickstoff so weit herunterkühlen, dass sie für den Infrarotsensor des *kill vehicles* unsichtbar würde.

Abwehr der Abwehr der Abwehr…

Eine andere Täuschungsmaßnahme wäre die Bestückung einer jeden ICBM mit Dutzenden von Attrappen, die wie Gefechtsköpfe aussehen. Wenn die ICBM am Ende ihrer Antriebsphase die leichten Attrappen und den schweren Gefechtskopf freisetzt, wären diese Körper wegen ihres schwerelosen Zustands auf der ballistischen Bahnkurve und der fehlenden Luftreibung außerhalb der Erdatmosphäre nicht zu unterscheiden. Der Angreifer könnte zudem Heizungen in die Attrappen einbauen, um sie mit der gleichen Infrarotsignatur wie der Gefechtskopf auszustatten. Noch einfacher wäre der Bau eines Antisimulationsgefechtskopfs – einer Waffe, die wie eine Attrappe aussieht. So könnte der Gefechtskopf von einem Radarstrahlen reflektierenden, mit Aluminium überzogenen Ballon umhüllt werden, der wie Dutzende anderer, leerer Täuschballons aussieht. Wenn das *kill vehicle* zwischen dem Gefechtskopf und den zahlreichen Düppeln nicht unterscheiden kann, müssten Hunderte von Abfangraketen gestartet werden, was die Raketenabwehr im Nu überfordern würde (siehe Kasten auf S. 72).

Es ist nun gerade die grundlegende Schwäche einer Abwehr in der mittleren Flugphase, dass sie so einfach zu unterlaufen ist. Der finanzielle und intellektuelle Aufwand für die Umsetzung von Täuschungsmanövern ist trivial, verglichen mit demjenigen für Konstruktion, Aufbau und Wartung der ICBMs selbst.

Leider macht die MDA die gekünstelte Annahme, dass Nordkorea (das bis heute noch keine ICBM getestet hat, die einen nuklearen Gefechtskopf tragen kann, obwohl der Auslandsgeheimdienst CIA einen entsprechenden Probeflug schon vor 1998 erwartete) keine Maßnahmen ergreifen würde, welche die US-amerikanischen Abfangraketen täuschen könnten. Ich bin von der Wirksamkeit dieser Täuschungsmaßnahmen – insbesondere von Attrappen und Antisimulationsballons – so überzeugt, dass ich der ▷

Mit Raketen auf Raketen schießen

Das Abwehrsystem des Pentagons für die mittlere Flugphase soll angreifende Gefechtsköpfe zerstören, während sie sich außerhalb der Erdatmosphäre befinden.

1 Entdeckung von Raketenstarts
Ein Satellit des Defense Support Program auf geosynchroner Umlaufbahn registriert die Abgasflamme einer in Nordkorea gestarteten ICBM. Der Satellit verfolgt die Flugbahn der Rakete bis zum Brennschluss des Triebwerks etwa 200 bis 300 Sekunden nach dem Start.

2 Verfolgen der Flugbahn
Wenn die Rakete ihre Startstufe abgeworfen und ihre »Bedrohungswolke« aus Gefechtskopf und Attrappen freigesetzt hat, verfolgt ein Radar die weitere Flugbahn. Gegenwärtig nutzt das Abwehrsystem das Frühwarnradar Cobra Dane auf der Aleuten-Insel Shemya Island. Dessen Funktion soll ab Ende 2005 ein modernes seegestütztes X-Band-Radar übernehmen.

3 Abfangen des Gefechtskopfs
Die Radardaten lenken die in Alaska oder Kalifornien gestarteten Aufprallgeschosse *(kill vehicle)* zur Bedrohungswolke. Deren Infrarotsensoren müssen den Gefechtskopf in dem Gewühle identifizieren und die Flugkörper auf Kollisionskurs bringen.

X-Band-Radar
Da das Abwehrsystem Gefechtsköpfe und Attrappen exakt verfolgen muss, erzeugt das X-Band-Radar, das aus Tausenden von Antennenelementen besteht, mittels so genannter Phasensteuerung einen eng gebündelten Mikrowellenstrahl. Auf diese Weise kann das Radarsystem Objekte unterscheiden, die nur 15 Zentimeter voneinander entfernt sind. Doch wenn der Gefechtskopf und die Täuschkörper in Radar reflektierendes Aluminium gehüllt sein sollten, könnte das System nicht mehr zwischen gefährlicher Waffe und harmlosen Attrappen differenzieren. Die schwimmende Plattform der Radaranlage wird etwa die Größe von zwei Fußballfeldern haben. Auch die Wohnräume der etwa 50-köpfigen Besatzung werden dort untergebracht.



Aufprallgeschosse
Die 64 Kilogramm schweren *kill vehicle* sind etwa 1,40 Meter lang und haben einen Durchmesser von 60 Zentimetern. Der Infrarotsucher, der den Flugkörper in den letzten Sekunden vor dem Zusammenprall zum Ziel leiten soll, ist an einem Teleskop angebracht (Foto rechts). Vier seitliche Düsen dienen der Kurskorrektur.



Leitzentrale
Befehlsleitung und Steuerung des Abfangsystems erfolgen vom Cheyenne Mountain Operations Center der US-Luftwaffe in der Nähe von Colorado Springs (Colorado). Die bisherigen Abfangtests wurden von einem Kontrollraum auf dem Kwajalein-Atoll (Foto) beobachtet.



Freisetzen des *kill vehicle*

Abfangrakete

Freisetzen des *kill vehicle*

Raketensilo Fort Greely, Alaska

Abfangrakete

KANADA

USA

Leitzentrale Cheyenne Mountain, Colorado

Raketensilo Vandenberg Air Force Base, Kalifornien



PAZIFISCHER OZEAN

Hawaii



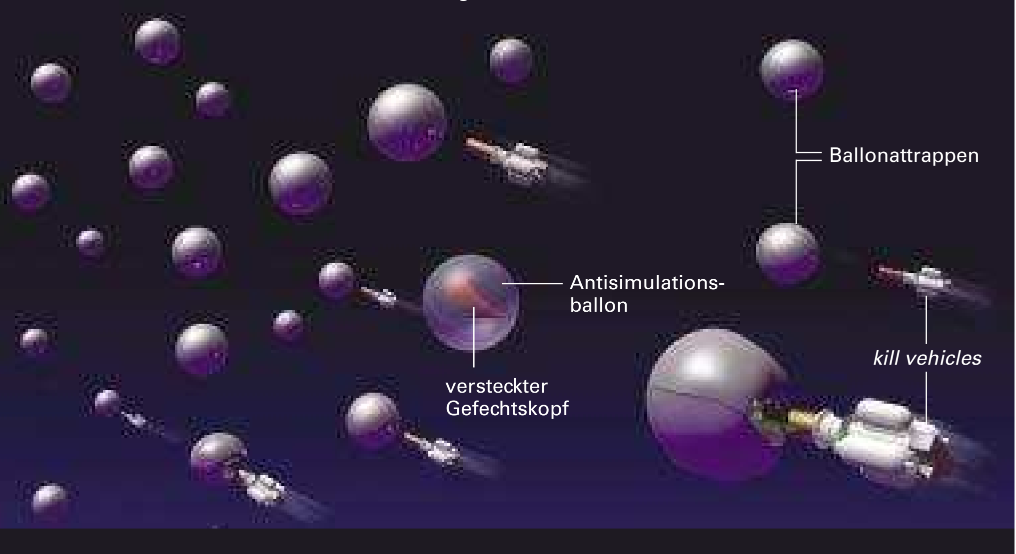
Abwehrrakete
Die erste der Abwehrraketen, mit ihren drei Stufen 17 Meter lang, wurde im Juli 2004 in ihr Silo in Fort Greely (Alaska) eingelassen. Bis Ende 2005 sollen dort 16 Abfangraketen aufgestellt werden; weitere zehn werden auf der Luftwaffenbasis Vandenberg (Kalifornien) stationiert.

Tarnen und Täuschen

Die Achillesferse der nationalen Raketenabwehr, wie sie gegenwärtig aufgebaut wird, sind die einfachen Täuschungsmöglichkeiten.

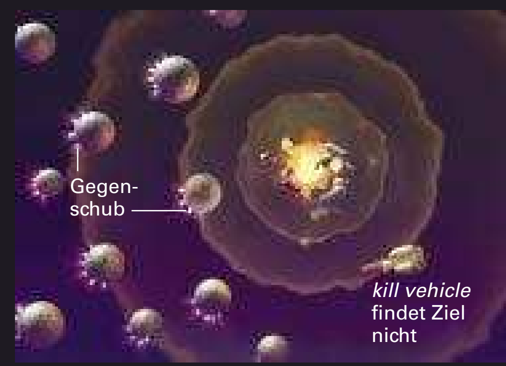
Selbst relativ unerfahrene Raketenmächte wie Nordkorea oder der Iran könnten ihre ICBMs mit Ballonattrappen ausstatten, die einen Gefechtskopf vortäuschen. Der Gefechtskopf selbst wiederum könnte ebenfalls in einem Ballon eingeschlossen sein, um die Täuschung noch wirkungsvoller zu machen. Heizquellen in den Ballonattrappen würden dafür sorgen, dass diese die gleiche Infrarotsignatur haben wie der den Gefechtskopf enthaltende Ballon.

Das Abwehrsystem wäre so gezwungen, jedes dieser Objekte zu zerstören, was den Vorrat an Abwehrraketen schnell aufzehren würde.



Wäre es möglich, die Abwehr so zu gestalten, dass sie zwischen Gefechtskopf und Attrappen zu unterscheiden vermag? Eine frühzeitig eintreffende Abfangrakete könnte detonieren und so eine Stoßwelle aus expandierendem Gas erzeugen, welche die leichten Attrappen, aber nicht den schwereren Ballon mit dem Gefechtskopf zur Seite treibt. Das X-Band-Radar würde die Bewegung entdecken und eine andere Abwehrrakete zum Gefechtskopf leiten (links). Doch die Ballons könnten mit einem eigenen Antrieb den Bewegungsdruck ausgleichen, bevor eine Kursabweichung aufgespürt würde (rechts).





Luft- oder weltraumgestützte Laser könnten Ballon für Ballon durch Aufheizen zum Platzen bringen (links). Doch der Angreifer könnte die Attrappen und den Gefechtskopf so konstruieren, dass sich neue Ballons aufblasen, sobald die ursprünglichen zerstört werden (rechts).





ALFRED T. KAMAJIAN

▷ Ballistic Missile Defense Organization (dem Vorläufer des MDA) bereits seit 1999 mit Nachdruck den Verzicht auf die Abwehr in der mittleren Flugphase und eine größere Priorität für die Abwehr in der Startphase empfehle.

Der einzig sichere Weg, Täuschungsmaßnahmen zu unterlaufen, ist das Abfangen der Rakete noch in der Startphase. Denn während das Triebwerk noch arbeitet, kann eine ICBM keine wirksamen Attrappen freisetzen – sie würden schnell zurückbleiben. Ein Angreifer könnte zwar immer noch versuchen, die Abwehrraketen in die Irre zu führen, indem er Täuschraketen startet, die mit gefechtskopftragenden ICBMs verwechselt werden können. Jedoch müsste jede dieser Täuschraketen mindestens zweistufig sein, um glaubwürdig wirken zu können; dies wäre sehr viel teurer als das Freisetzen einiger Dutzend Ballons.

Ein weiterer Vorteil der Abwehr in der Startphase bestünde darin, den Einsatz biologischer Waffen verhindern zu können. Am wahrscheinlichsten wären diese Substanzen in Hunderten von Minibomben verpackt, die von der ICBM direkt nach ihrem Aufstieg freigesetzt werden. Dieser Schwarm würde sich entlang der Flugbahn immer weiter ausbreiten. Das derzeitige, auf die mittlere Flugphase ausgerichtete Abwehrsystem könnte einen solchen Angriff nicht stoppen.

Die Fürsprecher des MDA-Systems argumentieren, dass sie letztlich die Startphasenabwehr in die nationale Raketenabwehr aufnehmen wollen. Aber die Strategie einer phasenweisen Abwehr, welche die Raketen in verschiedenen Flugphasen abzufangen versucht, ist nicht unbedingt kostengünstig. Jede der Abwehrphasen hat ihren Preis. Und die Investitionen in eine Abwehr während der Startphase würden die USA zuverlässiger schützen als der gleiche Betrag, wenn er in den Auf- oder Ausbau des mangelhaften Systems für die mittlere Flugphase investiert würde. Meine Gespräche aus dem Jahr 1999 mit Vertretern der Raketenabwehrbehörde wurden nicht fortgeführt, und die MDA verschleppte den Beginn eines formellen Programms für die Startphase um einige Jahre.

Im Jahr 2003 legte die Amerikanische Physikalische Gesellschaft (American Physical Society, APS) eine Analyse über die Möglichkeiten der Abwehr in der Startphase vor. Verfasst hatte sie eine

Gruppe hoch qualifizierter Physiker und Ingenieure, die zum großen Teil über jahrelange Erfahrung in der Raketenabwehr verfügen. Obwohl Presseberichte nahe legten, dass die Studie sich negativ zur Abwehr in der Startphase äußere, zeigt sorgfältiges Lesen jedoch eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit meinen qualitativen Bewertungen von 1999. Ich kam zu dem Urteil, dass 14-Tonnen-Abwehrraketen mit einer Brennschlussgeschwindigkeit von acht bis elf Kilometer pro Sekunde notwendig sein würden. Das Lenksystem würde die Flamme der ICBM ansteuern und dann den Raketenkörper. Schließlich würde das Abwehrgeschoss auf die Rakete prallen und ihre Triebwerke zerstören. Die Studiengruppe der APS untersuchte detailliert die möglichen Ausweichmanöver einer ICBM und die erforderlichen Fähigkeiten der Abwehrrakete, diesen zu begegnen.

Viele wollen Abwehrwaffen auch im Weltraum haben

Die APS-Gruppe zeigte, wie schwierig es wäre, eine von Nordkorea abgeschossene ICBM so abzufangen, dass ihr Gefechtskopf – der nach dem Zusammenstoß noch funktionsfähig sein könnte – garantiert nicht irgendwo auf dem Territorium der USA oder in einem anderen Land einschlägt. (Wenn die ICBM gegen Ende der Startphase getroffen wird, kann der Gefechtskopf noch genügend Impuls haben, um Nordamerika zu erreichen.) In meinen eigenen Schriften habe ich betont, dass die Abwehraktion noch als erfolgreich gelten sollte, selbst wenn der Gefechtskopf wieder in die Atmosphäre eintritt und einen zufälligen Punkt in den USA trifft, aber eben nicht die anvisierte Stadt. Da die mittlere Bevölkerungsdichte in den USA nur bei etwa einem Prozent der höchsten Dichte in den Städten liegt, würde die Abfangaktion den von der feindlichen Rakete angerichteten Schaden auf ein Hundertstel reduzieren. Das sollte reichen, um den Angreifer von vornherein von einem Angriff abzuschrecken.

Da die MDA zur Zeit berät, welche Optionen für die Startphase weiter verfolgt werden sollten, entstauben einige Regierungsbeamte die alten Pläne für weltraumgestützte Abwehrraketen, die Teil der ursprünglichen Strategischen Verteidigungsinitiative SDI waren. Das Konzept der Brilliant Pebbles zum Beispiel sah kleine Abfangraketen auf niedrigen Erdumlaufbahnen vor, die jeweils mit ausreichend Treibstoff ausgestattet sein sollten, um selbstständig eine aufsteigende ICBM anzusteuern und jedem Ausweichmanöver der Rakete begegnen zu können. Der Abgeordnete des Repräsentantenhauses Curt Weldon aus Pennsylvania, ein vehementer Befürworter der nationalen Raketenabwehr, warnte kürzlich die Verfechter der weltraumgestützten Abwehrraketen davor, gegen die Stationierung von land- und seegestützten Abwehrraketen einzutreten, da diese selbstzerstörerische Auseinandersetzung wahrscheinlich beide Programme verzögern würde. Doch viele Verfechter der Raketenabwehr machen keinerlei Hehl aus ihrem letztlichen Ziel: ein System zu stationieren, das chinesische und schließlich russische ICBMs abfangen kann. Nur ein weltraumgestütztes Abwehrsystem könne dieses Ziel erreichen.

Ein weltraumgestütztes System wäre jedoch extrem kostspielig und verwundbar. Abwehrraketen auf niedrigen Umlaufbahnen würden die Erde etwa alle 90 Minuten umkreisen; die USA müssten folglich mehr als 1000 von ihnen stationieren, um immer eine ausreichende Menge in der Nähe Nordkoreas zu haben, selbst wenn von dort nur eine einzige ICBM starten sollte.

Obwohl diese Abwehrsatelliten kleiner wären als land- oder seegestützte Raketensysteme, bräuchten sie genügend starke Triebwerke. Die APS-Gruppe schätzte die erforderliche Masse für diese Abwehrraketen auf 600 bis 1000 Kilogramm. Da es 20 000 Dollar kostet, auch nur ein einziges Kilogramm in den Weltraum zu befördern, könnte der Preis für ein weltraumgestütztes Abwehrprogramm leicht auf Dutzende Milliarden Dollar steigen.

Des Weiteren könnte der Umstand, dass ein weltraumgestütztes System sich auch gegen chinesische und russische ICBMs richten würde, die Regierungen dieser Länder dazu veranlassen, vorbeugende Schritte zu unternehmen. Das gilt insbesondere für China, da die Volksrepublik nur etwa zwei Dutzend nuklear bestückte ICBMs hat, die Nordamerika erreichen könnten. Wenn die USA Tausende von Abwehrraketen für die Startphase im Weltraum stationierten, würde China zweifellos mehr Langstreckenraketen bauen, denn das weltraumgestützte System kann durch das gleichzeitige Starten von mehreren ICBMs in einer eng begrenzten Region ausgehebelt werden. Zudem könnte China sich dazu animiert fühlen, die Abwehrsatelliten zu zerstören. Im Unterschied zu einem Präventivschlag gegen land- oder seegestützte Systeme hätte ein Angriff auf Weltraumwaffen keine Verluste an Menschenleben zur Folge und würde von der internationalen Gemeinschaft wohl nicht als kriegerischer Akt angesehen.

Eine Möglichkeit, Satelliten auf niedrigen Umlaufbahnen zu zerstören, wäre das Ausbringen einer Schrot- oder Partikelwolke in dieser Höhe. Beim Durchdringen dieser Wolke würde der Satellit zerfetzt. Die Chinesen wären in der ▷

Startphasenabwehr

Um eine ICBM zu zerstören, bevor sie den Gefechtskopf und die Attrappen freisetzt, muss das *kill vehicle* innerhalb der ersten Minuten nach dem Start mit der Rakete zusammenprallen. Die Abwehrrakete muss in der Nähe der anfänglichen Flugbahn der ICBM und nicht weiter als 1000 Kilometer von deren Abschussstelle entfernt stationiert sein. Bezogen auf Nordkorea könnten die Abwehrraketen auf Schiffen im Japanischen Meer stationiert werden. Um iranische ICBMs treffen zu können, müssten die Abwehrraketen im Kaspischen Meer oder im Persischen Golf gestartet werden.



▷ Lage, auch mit bodengestützten Raketen die Abwehrsatelliten einen nach dem anderen abzuschießen. Oder sie könnten winzige Minen in den Weltraum schicken, von denen jede nur wenige Meter von einem Abwehrsatelliten »parkt« und auf Befehl detonieren kann. Die gleichen Gegenmaßnahmen wären noch kosteneffektiver gegen einen weiteren Vorschlag zur Abwehr in der Startphase: den weltraumgestützten Laser, der größer und damit verwundbarer wäre als die Abwehrraketen.

Das schwächste Glied

Selbst die Leiter der MDA erwarten vom jetzigen Einsatzzustand der nationalen Raketenabwehr nicht viel. Generalleutnant Ronald Kadish, der langjährige Direktor der MDA und ihrer Vorläufereinrichtung, bemerkte im März 2004 während einer Anhörung vor dem Streitkräfteausschuss des US-Repräsentantenhauses, dass das, »was wir in 2004 und 2005 tun, nur der Ausgangspunkt – der Anfang – ist und nur sehr einfache Fähigkeiten einschließt«. Nach meiner Einschätzung ist der gegenwärtige Ansatz zur Abwehr von ICBMs aus den neuen oder etablierten Kernwaffenstaaten gänzlich unbrauchbar, da die Täuschungsmöglichkeiten während der mittleren Flugphase so effektiv sind.

Wichtiger noch ist Folgendes: Wenn es eine Bedrohung der USA durch Raketen gibt, dann geht sie weniger von ICBMs aus, als vielmehr von Flugkörpern kürzerer Reichweite. Falls ein Staat wie Nordkorea oder der Iran eine Stadt in den USA angreifen wollte, würde er höchstwahrscheinlich Kurzstreckenraketen von Schiffen vor der amerikanischen Küste abfeuern.

US-Verteidigungsminister Donald H. Rumsfeld bemerkte hierzu im Jahr 2002 auf einer Pressekonferenz: »Länder haben ballistische Flugkörper auf Schiffen stationiert – mehr als genug – überall in der Welt. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt befindet sich eine gewisse Anzahl vor unseren Küsten. Das ist ein stetes Kommen und Gehen. Mobile Abschussrampen werden einfach hochgefahren, eine Rakete wird abgeschossen, die Rampe heruntergefahren und zugedeckt. Ihre Radarsignatur ist nicht anders als diejenige von 50 anderen in ihrer Nähe.«

Doch trotz dieses Eingeständnisses plant das Verteidigungsministerium keine Stationierung eines Systems, das gegen diese Raketen schützen könnte.

Die Irrelevanz der einsatzbereiten Raketenabwehr ist mittlerweile auch langjährigen Befürwortern eines solchen Systems klar geworden. Der konservative Kolumnist George Will schrieb kürzlich, »eine Kernwaffe würde wohl nicht per ICBM eines Schurkenstaates nach Amerika kommen – der Absender würde ja einen Gegenschlag riskieren –, als viel wahrscheinlicher in einem Schiffscontainer, Lastwagen, Koffer, Rucksack oder einem anderen Alltagsgegenstand.«

Aber selbst für den unwahrscheinlichen Fall, dass die Abschreckung versagt und ein verantwortungsloser Staat eine ICBM startet, ist das System zur Abwehr in der mittleren Flugphase nicht die beste Art der Verteidigung. Die MDA sollte ihre Anstrengungen auf die Abwehr in der Startphase richten. Wenn es darum geht, ICBMs von Nordkorea oder aus dem Iran zu stoppen, sind land- oder seegestützte Abwehrraketen die beste Wahl. In all diesen Fällen muss die Verwundbarkeit des Abwehrsystems in Betracht gezogen werden, was weltraumgestützte Waffen ausschließt. Auch für die Raketenabwehr gilt die alte Weisheit: Eine Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Richard L. Garwin arbeitet seit 1950 für die US-Regierung zu technischen Fragen von Kernwaffen, Raketen, Luftabwehr und Raketenabwehr. Er ist experimenteller Physiker mit Forschungserfahrung in Kern- und Teilchenphysik, der Festkörperphysik und dem Nachweis von Gravitationswellen. Er war von 1994 bis 2001 Vorsitzender des Arms Control and Nonproliferation Advisory Board des US-Außenministeriums. 1998 gehörte er zu den neun Mitgliedern der Rumsfeld Commission to Assess the Ballistic Missile Threat to the United States.

Warum eine landesweite Raketenabwehr nicht funktioniert. Von George N. Lewis, Theodore A. Postol und John Pike. Spektrum der Wissenschaft 11/1999, S. 66

Report of the APS Study Group on Boost-Phase Intercept Systems for National Missile Defense. Von D. Kleppner et al. in: Reviews of Modern Physics, Bd. 76, Heft 3, S. S1, Juli 2004

Phasengesteuertes Radar. Von Eli Brookner. Spektrum der Wissenschaft 4/1985, S. 46

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Federuhr mit Solarantrieb

Das Federwerk der neu konstruierten Pendule von Patek, Philippe & Co. wird von einem kleinen Elektromotor aufgezogen, der seinen Strom aus einem Photoelement bezieht. Der kleine Motor … läuft bereits mit einem Strom von wenigen Mikroampere an. Dies würde einer 100 Lux starken Beleuchtung des Photoelements entsprechen. (Zum Lesen und Schreiben braucht man bei Allgemeinbeleuchtung etwa 500 Lux.) Wenn das Federwerk mit einer Gangreserve von 70 Stunden voll aufgezogen ist, schaltet sich der Motor, der das Werk … aufzieht, automatisch ab. *(Die Umschau, 55. Jg., Nr. 1, S. 28, Januar 1955)*

Biogas treibt Traktor an

Die Arbeiten zur Schaffung neuer Energiequellen in Form eines brennbaren Gases, das … durch biologische Aufschließung pflanzlicher Stoffe entsteht, befinden sich im Anfangsstadium … Durch das Vergären des Stallmistes und der in der Landwirtschaft anfallenden Abfallprodukte, wie Stroh, kann Biogas zum Kochen, Heizen, … oder zum Antrieb stationärer Motoren … Verwendung finden. Zum Betrieb von Ackerschleppern muß es jedoch verdichtet werden … Biogas ist schwefelfrei und wird … in Gasflaschen getankt. *(Landtechnik, 10. Jg., Nr. 2, S. 29ff, Januar 1955)*



▲ Für Biogasbetrieb umgebauter Traktor: Das Gas wird in Flaschen gefüllt, die auf dem Schlepper angebracht sind.

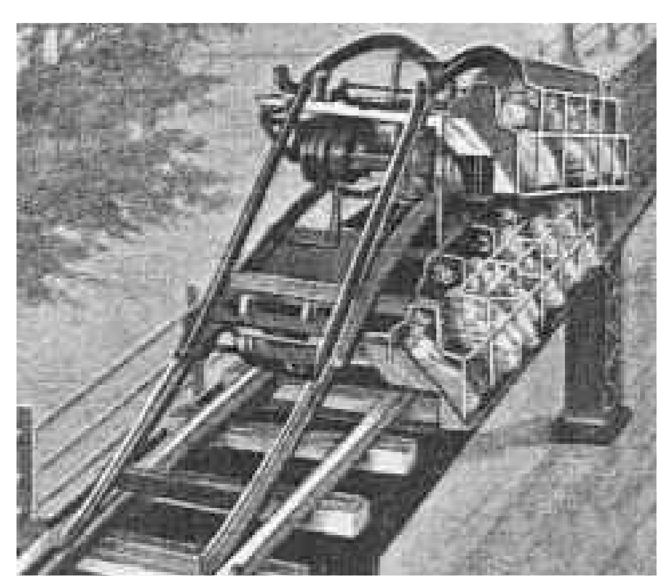
Lebendes Fossil entdeckt

Von den Quastenflosser-Fischen, aus der Familie der Coelacanthiden, deren Auffindung 1938 und 1952 weit über Fachkreise hinaus Aufsehen erregt hat, weil man sie für seit Jahrmillionen ausgestorben gehalten hatte, ist, wie am 15. November 1954 aus Tananarive (Madagaskar) gemeldet wurde, zum ersten Mal ein Exemplar lebend gefangen worden. *(Orion, 10. Jg., Nr. 1/2, S. I/1, Januar 1955)*



Zugunfälle vermeiden

Die Vorrichtung zur Verhütung von Eisenbahnzusammenstößen ist zunächst nur in kleinem Maßstabe in einem Seebade bei New-York ausgeführt, wo sie zum Amusement dient … Auf dem Gleis fahren zwei Wagen aufeinander los; … wenn der Zusammenstoß erfolgen soll, steigt der eine Wagen in die Höhe, fährt über den anderen hinweg und gleitet auf die Schienen nieder … Wie die Versuche auf einer wirklichen Bahnstrecke ablaufen werden, das dürfte wohl sehr fraglich sein. *(Illustriertes Jahrbuch der Erfindungen, 5. Jg., S. 31, 1905)*



▲ Zwei Züge kommen sich entgegen – mit Hilfe gebogener Schienenstücke gleiten sie übereinander hinweg.

Geschmack von Weib und Mann

Der Physiologe Vaschide hat … einen von ihm erfundenen Apparat benutzt, … um die Feinheit des Geschmacks bei Mann und Weib festzustellen. Das Verfahren bestand in der Benutzung wässeriger Lösungen von Stoffen mit bestimmtem Geschmack … Die Frau ist überlegen in der Erkennung der Geschmacksgerüche … Dieser Vorzug der Frau, wenn man von einem solchen in dieser Hinsicht sprechen darf, ist darauf zurückzuführen, dass die Frauen im Haushalt und in ihren Toiletteangelegenheiten den Gerüchen grössere Aufmerksamkeit zuwenden … Die Männer besitzen einen feineren Geschmack, wobei letzterer – natürlich! – nur in seiner eigentlichen Bedeutung zu nehmen ist. *(Die Umschau, 9. Jg., Nr. 5, S. 96, 28. Januar 1905)*

Ein Ur-Faxgerät

»Tautograph« hat Ingenieur Karl Gruhn einen von ihm erfundenen Apparat getauft … Mit diesem vermag man Handschriften und Skizzen per Draht auf weite Entfernungen genau wiederzugeben … Man zieht einen an einem Hebelarm gelenkig gefestigten und mit Graphiteinlage versehenen Schreibstift aus seinem Ruhelager und beginnt zu schreiben. Im selben Moment schaltet der elektrische Strom ein, und durch ein System von zwei erhellten beweglichen Spiegeln, deren Reflexe auf ein lichtempfindliches Papier fallen, entsteht im Empfangsapparat eine photographisch getreue Reproduktion. *(Phonographische Zeitschrift, 6. Jg., Nr. 2, S. 25, 11. Januar 1905)*

Die Größe der Allerkleinsten

Mit bloßem Auge sehen wir nur einen winzigen Ausschnitt des Spektrums aller Lebewesen. Die Biologie vernachlässigt, so kritisiert der Autor, vor allem die Welt der Mikroben und wird in ihren Forschungen der wahren Lebensvielfalt nicht gerecht.

Von Sean Nee

Manche Wesen dieser Erde »atmen« statt Sauerstoff Eisen oder Uran. Andere lieben heiße Schwefelsäure. Verschiedene Kreaturen würden sich in Putzmitteln wohl fühlen. Etliche Organismen betrachten sogar hartes Gestein als ihr Zuhause. Bakterien in Meeressedimenten bilden mehr Biomasse als jede andere irdische Lebensform. Viren wiederum gelten zwar nicht als Lebewesen – doch in den Ozeanen übertrifft ihre Menge die aller Organismen.

Was Neuentdeckungen in Sachen Biodiversität im Mikroskopischen betrifft, steht die Wissenschaft noch nah am Anfang. Die Blütezeit solcher Forschungen wird erst kommen – wann, dürfte wesentlich von technischen Fortschritten in der Molekularbiologie abhängen. Nötig ist allerdings auch eine viel offenere Einstellung der Wissenschaftler demgegenüber, wo überall Leben auftreten könnte. Und damit die neue Ära die ihr gebührende breite Anerkennung erfährt, bedarf es einer frischen Sichtweise der Natur. Das Bild der Lebenswelt wird sich ebenso radikal ändern wie jenes vom Kosmos, als wir begannen, den Himmel nicht mehr nur mit nacktem Auge zu betrachten.

Auch die zahlreichen Wunderwesen, die mit Sicherheit ihrer Entdeckung noch harren, können wir ohne Hilfsinstrumente nicht sehen. Wie schon mancher kluge Kopf meinte – wenn auch meist nur bezüglich Bakterien –, ist das irdische Leben im Grunde mikroskopischer Natur, ob man nun die Biomasse nimmt oder die Anzahl der Individuen. Eine neue Entdeckergeneration wird uns diese bisher unsichtbare, unbekannte Welt erschließen und dabei ungekannte Horizonte eröffnen. Noch kommt es vor, dass renommierte Zeitschriften Übersichtsartikel zur Biovielfalt publizieren, in denen Lebenserscheinungen von mikroskopischer Dimension höchstens am Rande erwähnt werden.

Aufruf zum Umdenken in der Biobranche

Um fair zu sein: Solche Arbeiten spiegeln den aktuellen Stand der Wissenschaft. Momentan ist die Forschung zur Biodiversität auf die sichtbare Welt fixiert. Ich behaupte auch nicht, dass namhafte Wissenschaftler wie Robert M. May von der Universität Oxford oder Edward O. Wilson von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) gegenüber dem nicht Sichtbaren blind wären. Aber es wird Zeit, dass Biologen Schülern, Studenten und der Öffentlichkeit nicht länger ein dermaßen eingeschränktes Bild vermitteln – womit ich alle meine, die sich für Biologen, Zoologen, Botaniker oder Ökologen halten. Einfach ist diese Aufgabe nicht.

Am Anfang steht die Einsicht, wie gering der Beitrag des sichtbaren Lebens zur biologischen Vielfalt ist. Biodiversität kann man in ganz verschiedener Hinsicht erfassen: von der Stammesgeschichte (Phylogenie) her, vom Stoffwechsel, von der Umwelt oder vom äußeren Erscheinungsbild (der Morphologie).

Die alten Stammbäume orientieren sich stark an makroskopischen Organismen. Sie zeigen fünf »Reiche«. Drei davon waren Tieren, Pflanzen und Pilzen vorbehalten. Schon bei dieser Klassifizierung drängen sich, genauer besehen, die Unsichtbaren vor. In der üblichen hierarchischen Gliederung steht gleich unter dem Reich der »Stamm«. Von den Tierstämmen enthalten 40 Prozent mikroskopische Arten, einige bestehen ausschließlich aus Winzlingen. Nimmt man die reine Zahl vorhandener Tiere, dann sind vier von fünfen mikroskopische Fadenwürmer, im Fachjargon Nematoden.

Inzwischen erlauben molekulare Daten einen neuen Blick auf die Verwandtschaftsverhältnisse der Lebewesen. Gern zieht man dazu Gensequenzen für wichtige Moleküle der Ribonukleinsäure (RNA) heran, die alle Organismen brauchen. Die Ribosomen etwa, an denen Proteine synthetisiert werden, bestehen aus mehreren RNA-Komponenten, unter anderem aus einer so genannten kleinen Untereinheit (englisch *small subunit*), bezeichnet als ssRNA.

Der Stammbaum, der sich aus den Gensequenzen für die ssRNA ergibt, sieht völlig anders aus als gewohnt (siehe Bild S. 78 oben). Dem sichtbaren, makroskopischen Leben kommen auf ihm lediglich ein paar ganz kurze, feine Ästchen zu. Eigentlich sollte das nicht überraschen – immerhin hatten die mikroskopischen Formen wenigstens drei Milliarden Jahre Zeit, um sich in verschiedene Richtungen zu entwickeln und evolutionäre Möglichkeiten auszutesten, bevor die »Großen« auftraten.

Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.

Im Yellowstone-Nationalpark in den USA gedeihen Mikroorganismen unter scheinbar lebensfeindlichen Bedingungen. Solche »Extremophilen« bevorzugen beispielsweise Schwefelquellen oder kochend heiße Gewässer.

Die Zweiglängen in dem ssRNA-Stammbaum ergaben sich zwar aus den berechneten Unterschieden dieser RNA-Moleküle. Doch sind sie zugleich ein Anhaltspunkt für den Verwandtschaftsgrad zwischen den Organismen. Arten, deren RNA-Gene nur entfernt miteinander verwandt sind, unterscheiden sich genetisch auch sonst in vieler Hinsicht.

Die chemischen Tricks der Mikroben

Ein Beispiel bieten die Microspora oder Microsporidia. Traditionell setzt man sie auf einen langen Ast an der Basis der Eukarya (Eukaryoten), einer der drei »Domänen« des Lebens. Zu den Eukarya zählen alle Organismen mit echtem Zellkern, somit auch alle Tiere und Pflanzen sowie die Pilze. Bei den Microspora handelt es sich um bemerkenswerte Parasiten, die Zellen befallen. Ihre Sporen sind in eine Art flexible Injektionsnadel eingewickelt. Damit stechen sie eine Zelle an und injizieren die Sporen dann selbst. Werden Menschen von solchen Schmarotzern heimgesucht, leiden sie an starkem Durchfall. Der den Microspora bisher zugewiesene Platz an der Basis der Eukarya ist fast mit Sicherheit ein Irrtum. Nach neuen Genomanalysen halten Forscher diese Parasiten für Pilze, und zwar sogar für ziemlich differenzierte Vertreter.

Ein anderes Maß für Vielfalt unter Lebewesen sind Stoffwechselformen. Leben braucht Energie. Große Organismen, ob Tiere oder Pflanzen, nutzen zu dem Zweck nur eine von vielen Möglichkeiten. Sie rauben organischen Kohlenstoffverbindungen Elektronen, die sie auf Sauerstoff übertragen. Anders gesagt: Sie atmen Sauerstoff und verbrennen damit Nahrung. Hauptsächlich auf diese Weise gewinnen Tiere und Pflanzen Energie – wobei Pflanzen ihre »Nahrung« mittels Sonnenlicht erst selbst erzeugen.

Die mikroskopische Welt verfügt über ein weit umfassenderes Stoffwechselrepertoire. Manche Organismen »veratmen« Metalle, die ihnen als Elektronenempfänger dienen, ähnlich dem Sauerstoff bei uns. Andere nutzen als Elektronengeber Metalle – sie »verbrennen« also Metalle als Nahrung. Energetische Erwägungen ergaben bereits vor einem Vierteljahrhundert, dass auch Organismen existieren sollten, die zum Energiegewinn Ammoniak mit Nitrit verbrennen. Kürzlich hat man tatsächlich Bakterien entdeckt, die gewissermaßen Ammoniak fressen und Nitrit atmen. Da behaupte noch jemand, die Biologie könne keine Vorhersagen machen.

Makroskopische Arten nutzen zur Herstellung organischer Verbindungen gerade eine einzige anorganische Energiequelle: Licht. Mikroorganismen grei- ▷

▷ fen dagegen auch auf chemische Energie zu. Vermutlich verwendeten die ersten irdischen Organismen dergleichen als Treibstoff. Mit vielerlei solchen Prozessen liefern Mikroben heute den reichen Artengemeinschaften die Lebensbasis, die in den Meerestiefen an den hydrothermalen Schloten gedeihen und von deren Existenz wir bis vor wenigen Jahrzehnten noch nichts ahnten.

Kein Leben ohne die Kleinen

Vor drei Millionen Jahren schon – also lange bevor große Organismen erschienen – waren die wesentlichen biogeochemischen Kreisläufe etabliert, von denen auch unsere Existenz abhängt. Noch heute halten Mikroben diese Zyklen dank ihrer Stoffwechselvielfalt aufrecht. Ohne die endlosen Schleifen, die etwa Schwefel, Eisen und Stickstoff in ihren verschiedenen chemischen Stadien durchlaufen, könnte das Leben auf der Erde nicht existieren. Zwar sind moderne Ökosysteme produktiver und die Zyklen laufen schneller. Tiere und Pflanzen bringen Tempo. Qualitativ Neues haben sie zur globalen Ökologie aber nicht beigetragen.

Was die Vielfalt der Lebensräume betrifft, lernen wir derzeit laufend dazu. So genannte extremophile (»das Extrem liebende«) Mikroben siedeln an den unmöglichsten Orten. In einem Autoklaven, wie man ihn zum Sterilisieren benutzt, unter Druck und bei 120 Grad Celsius, würden sich etwa Vertreter vom »Stamm 121« prächtig vermehren. Dieser »Eisen atmende« Organismus lebt gewöhnlich am Meeresgrund an hydrothermalen Schloten. Er übersteht noch Temperaturen von 130 Grad Celsius. Auf der Erde dürfte es kaum Extrembedingungen geben, die das Leben sich nicht erschlossen hat, ob es sich um scharfe Säuren, extrem alkalische Bedingungen oder konzentrierte Salzlösungen handelt. Das Tote Meer ist in Wahrheit höchst lebendig – nur Fische schwimmen darin nicht.

Zwar denken Forscher beim Stichwort »Extremophile« meist an Bakterien oder Archaeen (früher Archaebakterien). Inzwischen entdecken sie jedoch auch eukaryotische Mikroben, die es deftig lieben. Im Rio Tinto in Südwestspanien, dessen Wasser von gelösten Kupfererzen rot ist und so sauer wie Magensaft, lebt eine ganze Gemeinschaft davon. Zur Erforschung solcher Extremarten helfen die gleichen Methoden wie bei den Lebensformen ohne echten Zellkern. Man muss nur in den scheinbar unwirtlichsten Umwelten nach ihnen suchen.

Was die Formen- oder besser Erscheinungsvielfalt betrifft, gewinnen die makroskopischen Arten haushoch. Unter den Kleinstlebewesen verblüffen zumindest die Kieselalgen mit ihren bizarren Strukturen. Dennoch sind die Großen konkurrenzlos mit ihren Farben, mit Geräuschen, Verhalten, Emotionen oder gar Bewusstsein. Nur, im Gegensatz zu den Aktivitäten der mikroskopischen Organismen – nichts davon ist für das Leben auf der Erde wirklich wichtig. Erst deren Beitrag macht den Planeten für größere Formen bewohnbar. Die Kleinstlebewesen erzeugten und erhalten eine für das makroskopische Leben angenehme Atmosphäre und die notwendigen Nährstoffkreisläufe.

So hängt der atmosphärische Gehalt an Sauerstoff im Grunde vom Phytoplankton der Weltmeere ab. Eigentlich tragen die Landpflanzen zum Luftsauerstoff ja etwa die Hälfte bei. Das meiste hiervon verbrauchen die Landbewohner allerdings wieder selbst. Das für uns lebensnotwendige Gas verschwindet hauptsächlich deswegen nicht komplett aus der Luft, weil totes Phytoplankton massenhaft zum Meeresboden »regnet«, ohne vorher zu zerfallen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ *Archaeoglobus fulgidus* (hier ein Falschfarbenbild) lebt bei rund 80 Grad Celsius an Hydrothermalquellen der Tiefsee. Die Mikrobe reduziert Sulfat. Sie bildet eine Stoffwechselbrücke zwischen Methanbakterien und anderen extrem thermophilen Mikroorganismen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Dieser Stammbaum basiert auf Gensequenzen von ssRNA. Den weitaus größten Anteil zur Lebensvielfalt tragen Mikroorganismen bei. Große Lebewesen treten nur in drei verschwindend kurzen Zweigen auf: bei den Pflanzen, Tieren und Pilzen.

Dass der vielleicht häufigste dieser Planktonorganismen, ein wirklicher Winzling namens *Prochlorococcus*, erst vor nicht einmal zwanzig Jahren entdeckt wurde, ist wohl typisch für unsere großen Wissenslücken. Es hat wahrscheinlich emotionale Gründe, dass wir Äußerlichkeiten so hoch bewerten.

Wie sehr Biologen auf die Welt des Sichtbaren fixiert sind, zeigt sich auch darin, wer über Mikrowelten forscht. Abgesehen von einigen namhaften Ausnahmen finden sich hier selten Biologen oder Zoologen. Viel häufiger stößt man auf Geologen, Biotechnologen oder Ozeanografen, auf Ingenieure, Planetologen oder Astrobiologen. Revolutionäre Entdeckungen in dem Feld werden eher auf geologischen Kongressen verkündet als bei wissenschaftlichen Versammlungen zur Biodiversität.

Natürlich arbeiten viele dieser Forscher in Einrichtungen der Mikrobiologie. Es wird Zeit, die Kluft zwischen Biologie und Mikrobiologie zuzuschütten, die sich vor etwa eineinhalb Jahrhunderten auftat und seitdem im Wesentlichen

weiter besteht. Damals arbeitete Charles Darwin (1809–1882) seine Evolutionstheorie aus, wozu er Tiere und Pflanzen betrachtete. Etwa gleichzeitig forschte Louis Pasteur (1822–1895) über die alkoholische Gärung und entdeckte Organismen, die ohne Sauerstoff leben können. Er behandelte Lebensmittel mit Hitze, um sie haltbar zu machen, und entwickelte Impfstoffe.

Darwin war Biologe, Pasteur Mikrobiologe. Mikrobiologen arbeiten in Kläranlagen und in der Wein-Industrie, was Biologen normalerweise höchstens privat interessiert, selbst wenn sie Weinproben lieben. Viele in mikrobiologischen Lehrbüchern angesprochene Aspekte würden den durchschnittlichen Biologiestudenten wenig ansprechen, wenn nicht abstoßen. Die Biologen sind darum gefordert, Schülern und Studierenden sowie der Allgemeinheit dieses nicht so appetitliche Feld schmackhaft zu machen.

Bekenntnis zu einer neuen Biologie

Auf der anderen Seite sprechen Mikrobiologen bei der Suche nach neuen Organismen nicht einmal von Biodiversität, sondern von »mikrobieller Ökologie« oder »Umweltmikrobiologie«. Eine der wichtigsten Zeitschriften hierzu heißt »Applied and Environmental Microbiology«. Vermutlich ahnen die meisten Biologen nicht, wie wichtig gerade diese Zeitschrift für sie wäre. Doch selbst wenn Topwissenschaftsmagazine von Entdeckungen berichten, was übrigens recht häufig geschieht – welcher Ökologe oder Evolutionsbiologe schaut näher hin, wenn der Beitrag von Eisen oxidierenden, extrem Säure liebenden Archaeen und ihrer Rolle für saure Grubenwässer handelt? Dabei sind sie zumindest ebenso erstaunlich wie die Entdeckung von gestreiften Kaninchen in Südostasien. Forscher, die am aufkeimenden goldenen Zeitalter der Biodiversitätsforschung teilhaben wollen, müssen wohl oder übel die Grundlagen der Chemie wiederholen, allem voran die Redoxgleichungen.

Die sichtbare Natur betrachten wir sentimental, die nicht sichtbare egozentrisch. Was uns davon nützt, begrüßen wir, etwa Backhefe. Was für uns unbequem ist oder gar schädlich, möchten wir uns vom Halse schaffen, etwa eine Pilzinfektion. Ansonsten verschwenden wir an die Mikrowelt möglichst wenig Gedanken. »Geht man auf der Größenskala nach unten«, formulierte Robert May, »von den fantastischen großen Säugern und Vögeln über die noch unbekannten kleinen Gliederfüßer bis zu den Einzellern, Bakterien und den Viren, dann schwindet die Begeisterung für deren Vielfalt immer mehr und kehrt sich schließlich ins Gegenteil.«

Als Biologen müssen wir emotionale Voreingenommenheit erkennen und diese zurückdrängen. Ein Beispiel ist der Begriff »Syntrophie« (Syntrophismus). Nach einer weit gefassten Definition bezeichnet er ökologische Wechselbeziehungen insbesondere zwischen Mikroben, wie sie in Systemen ohne Sauerstoff vorherrschen – etwa in Sedimenten oder im Darm. Dabei dienen die Abfallprodukte des einen Organismus dem nächsten als Nahrung oder Energiequelle. Solche Netze können komplex aufgebaut sein. Sie entnehmen der oxidativen Welt organische Stoffe und liefern die Endprodukte Kohlendioxid und Wasser wieder ab. Dennoch ignorieren die wichtigen ökologischen Lehrbücher den Begriff bisher völlig. Ökologiestudenten erfahren nicht, dass ihr Darm ein artenreiches, verflochtenes Ökosystem birgt.

Diese Vernachlässigung der nicht sichtbaren Biowelten darf nicht länger andauern. Sonst wäre das so, als wolle man Astronomie lehren und dabei die Galaxien jenseits der Milchstraße nicht erwähnen oder im Physikunterricht bei Objekten von Stecknadelkopfgröße aufhören. ◁

Autor und Literaturhinweise



Sean Nee hat in Evolutionsforschung promoviert. Er arbeitet an der Universität Edinburgh. Der Artikel erschien erstmals unter dem Titel »More than meets the eye« in Nature, Bd. 429, S. 804, 2004. Er enthält weitere Literaturhinweise.

Wie viele Arten von Lebewesen gibt es? Von Robert M. May in: Spektrum der Wissenschaft 12/92, S. 72

An archaeal iron-oxidizing extreme acidophile important in acid mine drainage. Von Katrina J. Edwards et al. in: Science, Bd. 287, S. 1796, 10. März 2000

Striped rabbits in southeast asia. Von Alison K. Surridge et al. in: Nature, Bd. 400, S. 726, 19. August 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

BIOCAM

Ein Tumor wird rot

Mit fluoreszierenden Farbstoffen kann Hautkrebs besser erkannt und zerstört werden.

Von Bernhard Gerl

Ein erfahrener Dermatologe sieht an der Verfärbung und der Struktur der Haut, ob Krebs droht oder nicht. Doch welche Bereiche sind bereits bösartig und müssen entfernt, welche sollten nur überwacht werden? Greift der Arzt zum Skalpell, wird er großzügig schneiden, um sicherzugehen – unschöne Narben sind die Folge. Sitzt der Tumor knapp unter der Haut oder dort, wo bereits operiert wurde, ist die Beurteilung noch schwieriger, denn Narben haben eine andere Farbe und Struktur als gesunde Haut.

Schon seit den 1960er Jahren nutzen Mediziner fluoreszierende Farbstoffe in der onkologischen Diagnostik, da sich manche davon in Tumoren anreichern und diese durch höhere Fluoreszenzintensitäten verraten. Als Farbstoffe eignen sich Porphyrine, Moleküle, die in allen Körperzellen vorkommen (sie sind Teil der so genannten Atmungskette und werden bei der Biosynthese des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin benötigt).

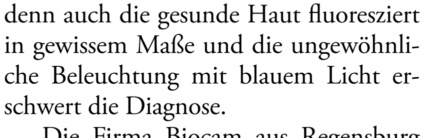
Diese Moleküle sind allerdings relativ groß und durchdringen nicht die Haut oder Schleimhäute. Damit sie die Tumore überhaupt erreichen, müssen sie in die Blutbahn gespritzt werden. Sie reichern sich dann im ganzen Körper an. Die so behandelten Patienten sind sehr lichtempfindlich – starke Sonnenbrände sind möglich. Diese Methode wird deshalb nur eingesetzt, wenn Organe im Körperinnern untersucht werden.

Eine lokal anwendbare Alternative für die Hautkrebsdiagnostik bietet die 5-Aminolävulinsäure (5-ALA). Dieses kleine wasserlösliche Molekül wird als Kreme oder Gel auf die betroffene Hautstelle aufgetragen und dringt rasch in die erkrankten Zellen ein. Dort wird es in den eigentlichen Fluoreszenzfarbstoff Protoporphyrin IX (PpIX) umgewandelt. Weil Krebszellen einen deutlich höheren Stoffwechsel als gesunde haben, reichert sich PpIX in ihnen an. Außerdem ist die natürliche Hornschicht der Haut über Krebszellen so verändert, dass 5-ALA leichter eindringen kann. So entsteht auf engstem Raum ein ausgeprägtes Konzentrationsgefälle an PpIX zwischen erkranktem und gesundem Gewebe.

Bildverarbeitung zur Früherkennung

Dieser Farbstoff absorbiert blaues Licht von 400 Nanometer Wellenlänge 10- bis 20-mal besser als anderes. Es wird aus dem Spektrum der in der Dermatologie üblichen Halogen- oder Xenonlampen ausgefiltert. In naher Zukunft sollen helle, blaue Leuchtdioden den apparativen Aufwand vereinfachen (für innere Organe eignen sich in der Wellenlänge abstimmbare Laser und Wellenleiter).

Der angeregte Farbstoff leuchtet im roten Spektralbereich. Zwar vermag der geschulte Arzt in einem abgedunkelten Raum schon mit bloßem Auge zu erkennen, welche Hautbereiche intensiver leuchten. Doch ohne weitere Hilfsmittel ist diese Bestimmung relativ ungenau, denn auch die gesunde Haut fluoresziert in gewissem Maße und die ungewöhnliche Beleuchtung mit blauem Licht erschwert die Diagnose.



Die Firma Biocam aus Regensburg hat deshalb vor zwei Jahren ein Komplettsystem für die Fluoreszenzdiagnostik und Tumorfrüherkennung vorgestellt. Es besteht aus Lichtquelle, Kamera und PC-gestützter Diagnosesoftware, die eine exakte Auswertung der generierten Bilder ermöglicht.

Der Chip der CCD-Kamera *(charge coupled devices)* nimmt jede Sekunde 33 Bilder mit einer Auflösung von 640 mal 480 Pixel auf. Bei jedem fünften blitzt die Lichtquelle und regt damit den Farbstoff zur Fluoreszenz an. Zusätzlich zu den Videoaufnahmen der Haut entstehen so mit winziger Verzögerung deckungsgleiche Fluoreszenzbilder. Das Auge vermag diesen schnellen Wechsel nicht auszumachen und sieht einen Film, in dem normale Hautaufnahmen und die Farbstoffbilder einander überlagern. Das Fluoreszenzbild kann auch in Graustufen oder Falschfarben angezeigt werden, um Intensitätsunterschiede mit maximalem Kontrast darzustellen (siehe Fotos unten), und Bildverarbeitung hilft, kritische Bereiche feiner aufzulösen.

Biocam hat sein System erfolgreich in Deutschland, Europa und sogar nach Taiwan verkauft. Letzteres mag für Experten überraschend sein, denn Hautkrebs ist in Asien selten. »Das öffnet uns den Markt in Australien und dort ist das Hautkrebsrisiko für hellhäutige Menschen besonders hoch«, erklärt Forschungs- und Entwicklungsleiter Günther Ackermann.

Inzwischen arbeitet die Firma an einer Variante für Hals-Nasen-Ohrenärzte – der Rachenraum bietet gute Bedingungen für das Verfahren. Der Fluoreszenzfarbstoff soll in Orangensaft gelöst und zehn bis zwanzig Minuten gegurgelt werden. »Entzündungen und Geschwüre lassen sich dort von Krebs schwer unterscheiden«, erläutert Ackermann. Ein Prototyp des Geräts steht in der Berliner Benjamin-Franklin-Klinik. Bald soll eine kleinere Kamera, eingebaut in ein Endoskop, tiefer liegende Körperteile wie den Kehlkopf auf Krebs überprüfen. ◁

Ein dunkler Fleck (Pfeil) alarmierte den Hautarzt die Überlagerung mit höheren Fluoreszenzintensitäten (Mitte) zeigt aber, dass dort kein Farbstoff angereichert wurde. Doch Entwarnung wäre verfrüht: Im ungefilterten Fluoreszenzbild (rechts) leuchten andernorts Tumorzellen.



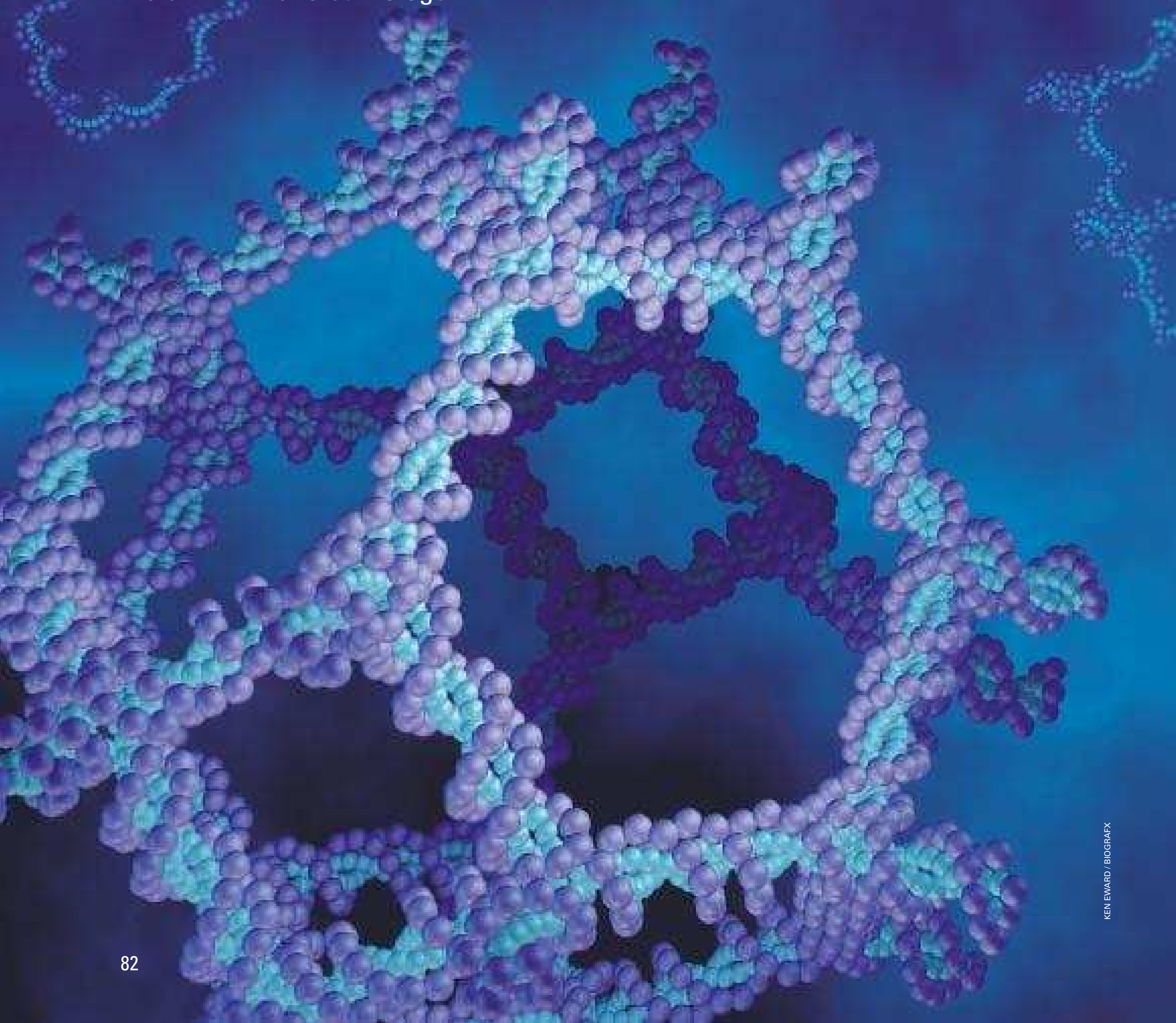
ALLE BILDER: BIOCAM GMBH, REGENSBURG



Der Physiker **Bernhard Gerl** arbeitet als freier Technikjournalist in Regensburg. Der Autor dankt Wolfgang Bäumler von der Uniklinik Regensburg für fachliche Beratung.

Karriere für die Doppelhelix

Von Berufs wegen ist die DNA eigentlich Träger unserer Erbinformation. Nun entpuppt sie sich auch als vielseitiges Molekül für Nanotechnologen.



KEN EWARD / BIOGRAFX

Von Nadrain C. Seeman

Nur wenige Forscher haben die Welt so nachhaltig geprägt wie James D. Watson und Francis H. Crick. Als sie 1953 die Doppelhelixstruktur der Erbsubstanz DNA erkannten, legten sie den Grundstein für die moderne Molekularbiologie. Mit einem Mal waren Genetik, Biologie und Chemie miteinander aufs Engste verwoben. Heute ergründen Tausende von Forschern die schier unbegrenzten Möglichkeiten, mit denen Gene, verschlüsselt im DNA-Alphabet aus gerade mal vier verschiedenen molekularen Buchstaben, die Entwicklung und Funktionsweise von Organismen steuern.

Doch im Windschatten der Erforschung von Krankheitsursachen oder der gentechnischen Produktion von Wirkstoffen bahnt sich eine neue Hochzeit an. So bewies Leonard M. Adleman von der Universität von Südkalifornien schon 1994, dass DNA auch zur Datenverarbeitung taugt (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 70). Mittlerweile erfinden Biotechnologen die Doppelhelix gleichsam neu, sodass sie Eigenschaften erhält, die von der Natur niemals vorgesehen waren.

Zum Beispiel können wir heute aus den vier Grundbausteinen mit den kennzeichnenden Basen Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin regelmäßige »Kristall«-Gitter konstruieren. Eine mögliche Anwendung: Große Biomoleküle, die bei einer Krankheit eine Schlüsselrolle spielen, lassen sich darin einschließen und somit fixieren. Röntgenkristallografen haben es dann leichter, die räumliche Struktur zu bestimmen. Ist die einmal bekannt, lassen sich zum Beispiel maßgeschneiderte Wirkstoffe gegen diese Moleküle einsetzen. Solche DNA-Gitter könnten aber auch das Gerüst für nanoelektronische Komponenten abgeben oder die molekulare Architektur neuer Werkstoffe präzise vorgeben; selbst Nanomaschinen sind damit realisierbar.

Wer seine Arbeit mit dem Präfix »Nano« schmückt, spricht von einer Welt, deren Dimension in milliardstel Metern gemessen wird. Eine typische Bindung zwischen zwei Atomen ist etwa 0,15 Nanometer lang, der Durchmesser der DNA-Helix beträgt »schon« etwa zwei Nanometer. Die Steighöhe einer vollen Umdrehung der Schraube liegt bei 3,5 Nanometern. Jede Windung der DNA-Wendeltreppe umfasst rund zehn Stufen, sprich Basenpaare (siehe Bild im Kasten S. 85).

Schon ein kurzes Stück Erbsubstanz kann hochspezifisch mit anderen Stoffen interagieren, einschließlich seinesgleichen. Gentechnologen nutzen schon seit vielen Jahren die Eigenschaft eines einzelnen DNA-Strangs, sich mit einem komplementären Gegenüber zu vereinen – die Base Adenin paart sich mit Thymin und Cytosin mit Guanin. Wenn die Fachleute zum Beispiel ein Gen in eine »Genfähre« einbauen, sorgen sie dafür, dass die zu verbindenden Stränge *sticky ends* (klebrige Enden) haben. Das sind ungepaarte Basen eines Helixstrangs, die über den anderen hinausragen und nun nach einem passenden Gegenstück als Partner suchen. Eine andere Anwendung der »Paarungsneigung«: Um eine Gensequenz in einem Molekülgemisch zu suchen, angelt man danach mit einzel- ▷

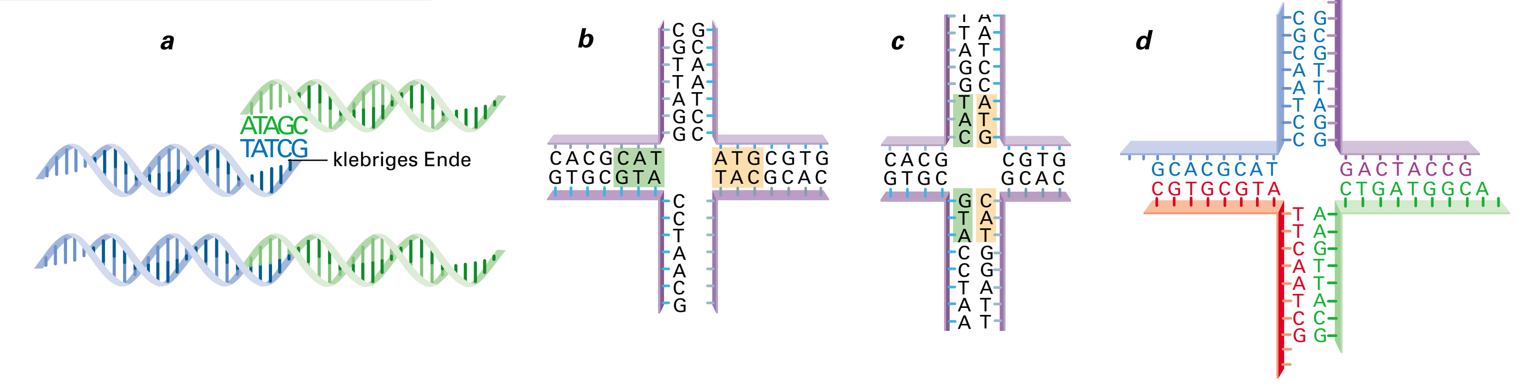
IN KÜRZE

▶ **DNA ist ein ideales Molekül** zum Aufbau von Strukturen im Nanometerbereich. Ihre Stränge können so programmiert werden, dass sie sich von alleine zu komplexen Strukturen ordnen, bevorzugt in Form von Doppelhelices.

▶ **DNA-Gerüste** sollen interessante Moleküle fixieren, um sie kristallografisch zu untersuchen. Sie könnten auch elektronische Bauelemente in Molekülgröße aufnehmen oder zum Aufbau von Werkstoffen mit präzisen molekularen Konfigurationen genutzt werden.

▶ **DNA-Maschinen im Nanobereich** funktionieren, indem ein Teil ihrer Struktur von einer räumlichen Gestalt (Konformation) zu einer anderen wechselt. Diese Bewegung lässt sich chemisch oder mit speziellen DNA-Strängen kontrollieren.

Künstliche DNA bildet komplizierte Strukturen, wenn ihre Basensequenzen zur Paarung mit passenden Partnern ausgelegt wurden. Hier hat sich ein angeschnittenes Oktaeder gebildet, seine Kanten sind etwa zwanzig Nanometer lang. Aus jeder Ecke ragt ein kurzes Stück DNA heraus, mit denen derartige Gebilde zu einem dreidimensionalen Gerüst verbunden werden können.



strängigen DNA-Stücken. Was sich damit sonst noch anstellen lässt? Noch einen Moment Geduld bitte.

Ingenieuren verheißt unsere Erbsubstanz auf den ersten Blick wenig Interessantes. Natürliche DNA bildet eine lineare Kette, ähnlich einem langen Stück Schnur, gelegentlich auch einen geschlossenen Ring. Man könnte sie dann allenfalls verdrillen oder verknoten, doch das sind nicht unbedingt die Strukturen, die für ein Nanosystem taugen. Zum Glück gibt es Prozesse in der Zelle, während derer sich das Molekül kurzzeitig verzweigt: Der eine ist die Replikation, also die Vervielfältigung der DNA im Zuge einer Zellteilung. Der zweite und für uns wichtigere ist die Rekombination, bei der genetisches Material zwischen Chromosomenpaaren ausgetauscht wird. Dieser Vorgang ist ein wichtiger Schritt bei der Produktion von Ei- und Samenzellen.

In beiden Fällen entwindet sich die Doppelhelix teilweise, damit die beiden Einzelstränge frei liegen. Bei der Replikation entsteht aus jedem Strang eine neue Doppelhelix, indem spezielle Funktionseinheiten der Zelle auf der ganzen Länge die zum alten Strang komplementären Nukleotide anlagern (jeder dieser Bausteine besteht aus einer Base und dem dazugehörigen Abschnitt für den »Holm« der DNA-Wendeltreppe).

Interessanter ist hier aber die Rekombination, denn der Austausch von DNA-Stücken, das *cross over*, verlangt Brüche in den Strängen und es bildet sich kurzzeitig eine kreuzförmige Struktur. Dabei paart sich je ein Stück Einzelstrang mit seinem Pendant auf der anderen Helix. Doch so ohne Weiteres lässt sich das natürliche Phänomen nicht technisch nutzen, denn der Verzweigungspunkt kann sich auf Grund der Symmetrieeigenschaften seiner Nachbarsequenzen verschieben (siehe die Grafik oben).

Vor nun gut 25 Jahren entdeckte ich mit Bruce H. Robinson (jetzt an der Universität von Washington) einen Weg, wie sich der Verzweigungspunkt bei synthetischer DNA fixieren ließe. Dazu benötigt man vier Einzelstränge, deren Sequenzen so ausgelegt sind, dass jeweils eine Hälfte zur komplementären Hälfte eines zweiten Stranges passt, die andere zum Gegenstück auf dem dritten. Der vierte schließlich muss hälftig zum zweiten und dritten Strang passen (siehe Diagramm oben rechts, *e*).

Die Kunst, DNA zu verzweigen

In welcher Richtung eine chemische Reaktion abläuft und welche räumliche Gestalt, fachlich Konformation, ein großes Molekül wie die Erbsubstanz annimmt, hängt von einer bestimmten thermodynamischen Größe ab, der freien Energie. Chemische Systeme tendieren immer dazu, einen Zustand zu erreichen, in dem ihre freie Energie möglichst klein wird. Nicht anders verhält sich ein Ball, der kaum darauf verzichten wird, in eine Mulde zu rollen. Für die natürliche DNA stellt die Doppelhelixstruktur eine solche Kuhle in der Landschaft der freien Energie dar.

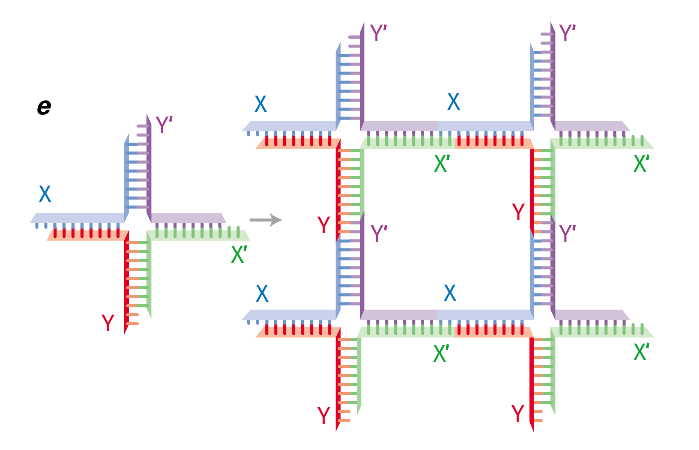
Verzweigungspunkte bilden hingegen Hügel, denn durch sie wächst zunächst die freie Energie des Moleküls. Doch bilden die von dort abzweigenden vier Arme ihrerseits Doppelhelices, wird dieser Anstieg mehr als wettgemacht. Heutzutage ist es Routine, solche Stränge zur Bildung stabiler verzweigter DNA-Moleküle zu fabrizieren; 1979 jedoch war das Chemie an der vordersten Front. Als gelernter Kristallograf überließ ich damals die Synthese noch meinen Partnern und beschäftigte mich vor allem mit dem Grundkonzept.

Eigentlich sollte es doch möglich sein, Verzweigungen mit mehr als vier Armen zu erzeugen. Irgendwann im Herbst 1980 sinnierte ich in unserer Campuskneipe über den Holzschnitt »Tiefe« des holländischen Künstlers M. C. Escher (siehe Bild S. 87). Dabei fiel mir auf, dass das Zentrum eines jeden dargestellten Fisches einem idealisierten sechsarmigen Verknüpfungspunkt ähnelte. Vom Zentrum eines Tiers gehen sechs Gebilde aus: Kopf und Schwanz, obere und untere, rechte und linke Flosse. Die Fische wirken wie Moleküle in einem Kristall. Und dann erinnerte ich mich der klebrigen DNA-Enden: Damit müsste es möglich sein, Materie im Nanometerbereich in ähnlicher Weise zu organisieren.

Unser Interesse an solchen Strukturen hat verschiedene gute Gründe: Werkstoffe, deren molekulare Verknüpfung wir präzise einstellen können – das ist Stoff für die Träume der Materialforscher. Genau definierte periodische Molekülanordnungen mit präzise eingehaltenen Wiederholungsabständen wären zum Beispiel eine wichtige Vo-

Die Struktur von DNA

Unsere Erbsubstanz besteht aus einem doppelten Rückgrat aus Phosphat- und Zuckermolekülen, zwischen denen komplementäre Basenpaare (Adenin und Thymin, Cytosin und Guanin) durch schwache Bindungen verknüpft sind (links). Die häufigste Konformation von DNA ist die B-Form (Mitte), eine rechtshändige Doppelhelix mit einem Durchmesser von etwa zwei Nanometern. Die Steigungshöhe einer vollen Windung der Helix beträgt rund 3,5 Nanometer, das umfasst 10 bis 10,5 Basenpaare. Unter bestimmten Umständen kann DNA auch eine linkshändige Doppelhelix, Z-DNA genannt, bilden (rechts).



Das Arsenal der DNA-Nanotechnologen umfasst so genannte *sticky ends* (klebrige Enden, *a*), um Module zu verknüpfen. Ein zweiter essenzieller Baustein ist verzweigte DNA *(b)*, in der mindestens drei oder mehr Helices an einer Art Kreuzungspunkt vereint sind. Normalerweise kann dieser Punkt wandern *(c)*, doch in der hier dargestellten Variante ist er fixiert *(d)*. Mehrere solcher Module lassen sich zu Gittern kombinieren *(e)*.

raussetzung photonischer Kristalle, Werkstoffe, die Licht manipulierbar machen wie Halbleiter den elektrischen Strom (Spektrum der Wissenschaft 4/2002, S. 66).

Ein weiteres Ziel nannte ich bereits: die DNA als Gitterwerk zu nutzen, um darin andere Moleküle einzufangen, insbesondere solche, die von sich aus keine regelmäßigen Kristallstrukturen ausbilden. Dazu gehören vor allem Proteine. Dann könnten wir Kristallografen ihre dreidimensionalen Strukturen aufklären – das entscheidende Verfahren bei der computergestützten Entwicklung von Arzneistoffen, die genau auf spezifische Teile des Zielmoleküls passen müssen.

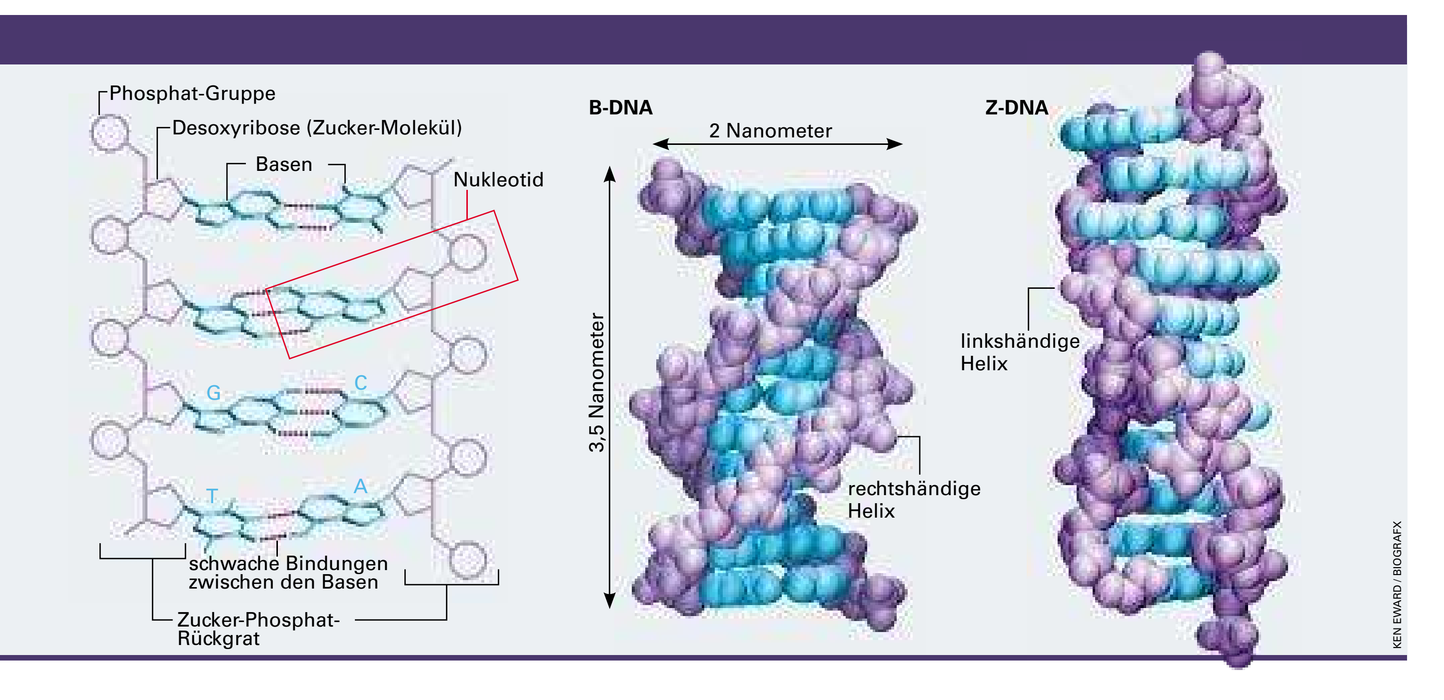
Warum ist DNA für solche Zwecke überhaupt geeignet? Hauptsächlich wohl, weil die Stränge auf genau vorhersagbare und damit programmierbare Weise miteinander wechselwirken. Ein *sticky end* koppelt nur an ein passendes Gegenüber. Andererseits kann es bei einer Länge von n Basen aus 4n verschiedenen Sequenzen bestehen. Diese enorme Variationsbreite erlaubt die Synthese von ungewöhnlichen Molekülen aus einer Vielzahl verschiedener Stränge, die höchst spezifisch miteinander verbunden sind. Zudem wissen wir, dass zwei aneinander haftende Strangenden die klassische Doppelhelixstruktur von DNA bilden, und die ist relativ steif.

Griff in den Werkzeugkasten der Biotechnologie

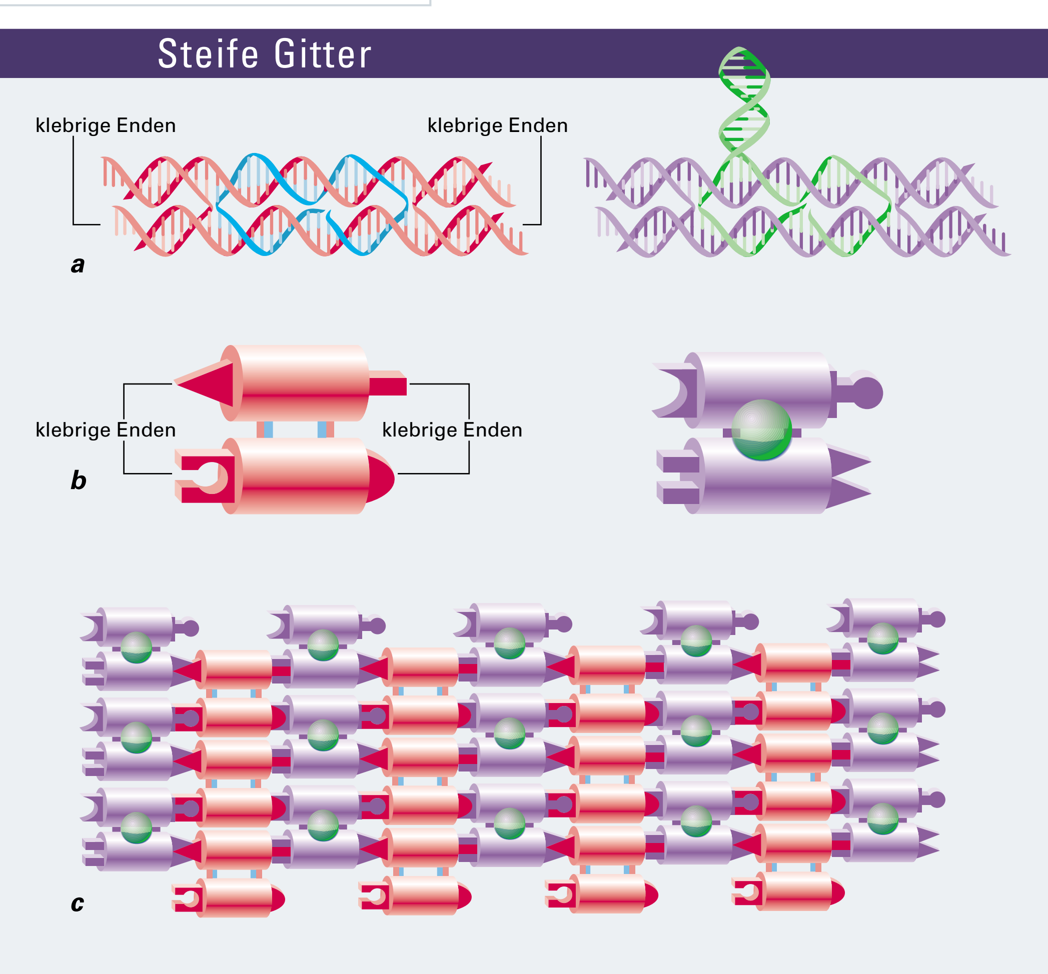
Kurzum: Wir wissen nicht nur, welche Stränge sich mit welchen verbinden werden, sondern kennen auch die Form der verbundenen Segmente im Detail. Solch spezifische Information besitzen wir leider nicht für Proteine einschließlich der Antikörper, weiteren Kandidaten für die Nanotechnik. Auch diese Stoffgruppe hat eine riesige Variationsbreite. Doch herauszufinden, welche Form ein Protein annehmen wird oder wie es sich mit einem Antikörper verbindet, ist äußerst mühsam.

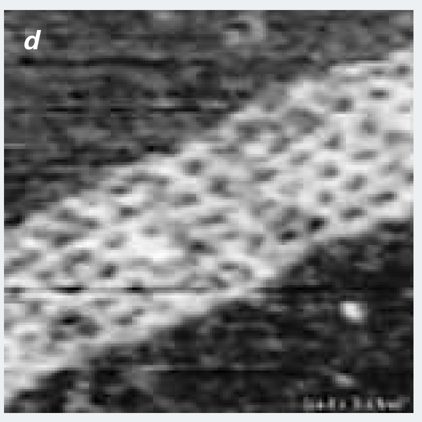
Ein weiterer Grund, mit DNA zu arbeiten, ist ihre einfache Synthese und ihre Konstruktion, die sich mit biotechnologischen Werkzeugen beliebig manipulieren lässt. So können wir das Molekül mit so genannten Restriktionsenzymen an bestimmten Stellen aufschneiden und mit anderen Biokatalysatoren namens Ligasen wieder fest verknüpfen. Diese Werkzeuge erlauben neben konventioneller DNA auch exotische Derivate herzustellen. Bei denen sind dann zum Beispiel andere Basen als die vier üblichen eingebaut oder am DNA-Rückgrat hängen ungewöhnliche chemische Gruppen. Einige Mediziner sehen in solchen Derivaten neue Hoffnungsträger für die Therapie.

Nach diesem kurzen Zwischenstopp möchte ich ein paar Jahre überspringen. Einige grundlegende Verfahren standen bereit, doch würde es funktionieren, damit wirklich DNA-Gitter zu bauen? Gemeinsam mit Junghuei Chen, jetzt an der Universität von Delaware, unter- ▷



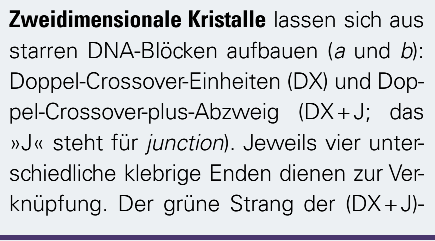
Steife Gitter







ALICE Y. CHEN; FOTOS: NADRIAN C. SEEMAN



Zweidimensionale Kristalle lassen sich aus starren DNA-Blöcken aufbauen (*a* und *b*): Doppel-Crossover-Einheiten (DX) und Doppel-Crossover-plus-Abzweig (DX + J; das »J« steht für *junction*). Jeweils vier unterschiedliche klebrige Enden dienen zur Verknüpfung. Der grüne Strang der (DX + J)-Einheit ragt aus der Ebene heraus. Jeder Block misst etwa 4 mal 16 Nanometer. Aus Gründen der Einfachheit sind beide Typen schematisch dargestellt, die geometrischen Gebilde jeweils am Ende repräsentieren die klebrigen Enden. In Lösung haften diese aneinander und die Einheiten bilden ein zweidimensionales Muster *(c)*. DNA, die aus den (DX + J)-Einheiten herausragt, sieht das Kraftfeldmikroskop als helle Streifen jeweils im Abstand von 32 Nanometern *(d)*. Auch DNA-Parallelogramme lassen sich in zweidimensionalen Mustern anordnen (*e* und *f*).

▷ suchte ich die Machbarkeit einer DNA-Nanotechnik anhand der einfachsten Gittergrundstruktur – eines Kubus. Wir synthetisierten 1991 einen aus DNA-»Stäben« aufgebauten Würfel (siehe Bild S. 88). Jede Kante bestand aus einer Doppelhelix, die Ecken waren Verknüpfungspunkte mit jeweils drei Strängen und jede der Ecken war mit drei anderen verbunden. Gentechniker hatten bereits viele lineare DNA-Gebilde hergestellt, aber dies war das bislang komplexeste. Die einzelnen Stücke wurden so synthetisiert, dass sie zueinander passten. Die freien Enden haben wir mittels Ligasen verknüpft: So entstanden sechs Schlaufen, eine für jede Würfelseite. Die Helixstruktur hat den angenehmen Nebeneffekt, dass der Strang einer Schlaufe sich auch teilweise um die flankierenden windet. Selbst wenn sich alle Basenpaare lösen würden, wäre der Würfel nicht auseinander zu ziehen.

Yuwen Zhang, jetzt bei Baxter Healthcare, baute mit mir eine weitere Struktur auf, ein angeschnittenes Oktaeder (siehe Bild S. 82). Es ähnelt einem Würfel, ist aber etwas komplizierter. Obwohl dreiarmige Verknüpfungspunkte genügt hätten, verwendeten wir einen Arm an jeder Ecke mehr, um später mehrere solcher Oktaeder zu einer größeren Struktur zu verbinden. Doch unser Fertigungsverfahren erwies sich als viel zu aufwändig – nach wenigen gelungenen »Kunstwerken« gaben wir auf.

Hinzu kam, dass sich unsere Polyeder in den Experimenten keineswegs völlig starr verhielten. DNA ist zwar ein steifes Molekül, und ein nur zwei oder drei Windungen großes Stück (das war die Länge der Kanten des Gebildes) wackelt kaum um seine zentrale Achse, doch die Winkel an den Ecken erwiesen sich als recht variabel. Es wirkte ein bisschen, als hätten wir Zahnstocher in Marshmallows gesteckt, um sie zu verbinden. Für irgendetwas mag eine solche Struktur eines Tages sicher gut sein, als Grundgerüst etwa eines neuen Werkstoffs taugt sie aber nicht.

Wie ließ sich dieses Problem lösen? Meine Gruppe untersuchte ein weiteres Verzweigungsmuster in biologischen Rekombinationssystemen, das so genannte DNA-Doppel-Crossover-Molekül (DX). Wie der Name andeutet, besteht es aus zwei Doppelhelices, deren nebeneinander liegende Stränge einander an zwei Stellen überkreuzen und sie so miteinan-

der verknüpfen (siehe Bild im Kasten links). DX erwies sich bereits als starr. Mit einem zusätzlichen kleinen Doppelhelixbereich – fachlich: DX+J (für *junction*) – war es noch steifer. Dieser J-Bereich, eine Art verdrillte seitliche Haarnadelschleife in einem Strang, erzeugte einen Buckel auf dem DX-Molekül, der sich als Markierung eignet, sozusagen die nanotechnologische Entsprechung eines Farbkleckses.

Ein Barcode aus DNA

In Zusammenarbeit mit Erik Winfree vom California Institute of Technology in Pasadena kombinierten meine Mitarbeiter Furong Liu und Lisa A. Wenzler an der Universität New York beide Varianten. Mittels *sticky ends* ließen diese sich wie Bausteine zu zweidimensionalen Kristallen definiert kombinieren (siehe Kasten links). Und kürzlich verwendete John H. Reifs Gruppe an der Duke University zwei vergleichbare DNA-Bausteine, um damit die Zahlen »0« und »1« zu repräsentieren und einen regelrechten »DNA-Barcode« zu erzeugen. Er verwendete dazu einen so genannten Input-DNA-Strang, dessen Sequenz das Muster »01101« kodierte. Die zugegebenen Bausteine – Einsen und Nullen – fügten sich von alleine an dessen entsprechenden Abschnitten zusammen. Dann lagerten sich viele solcher fünfteiligen Sequenzen parallel aneinander, sodass ein Muster aus etwa 15 Nanometer breiten Streifen entstand. Untersucht man sie mit einem Kraftmikroskop, liest man dabei umgekehrt auch die im Input-DNA-Strang kodierten Daten aus. Dieses visuelle Verfahren könnte DNA-basiertes Rechnen erheblich beschleunigen.

Mit Chengde Mao – jetzt an der Purdue University in West-Lafayette (Indiana) – entdeckte ich eine weitere Lösung des Problems, ausreichend steife Strukturen zu bauen. Aus DNA-Parallelogrammen, die unseren Stabpolyedern ähnelten, kreierten wir zweidimensionale



M. C. ESCHER, TIEFE, 1955; THE M. C. ESCHER COMPANY 2004

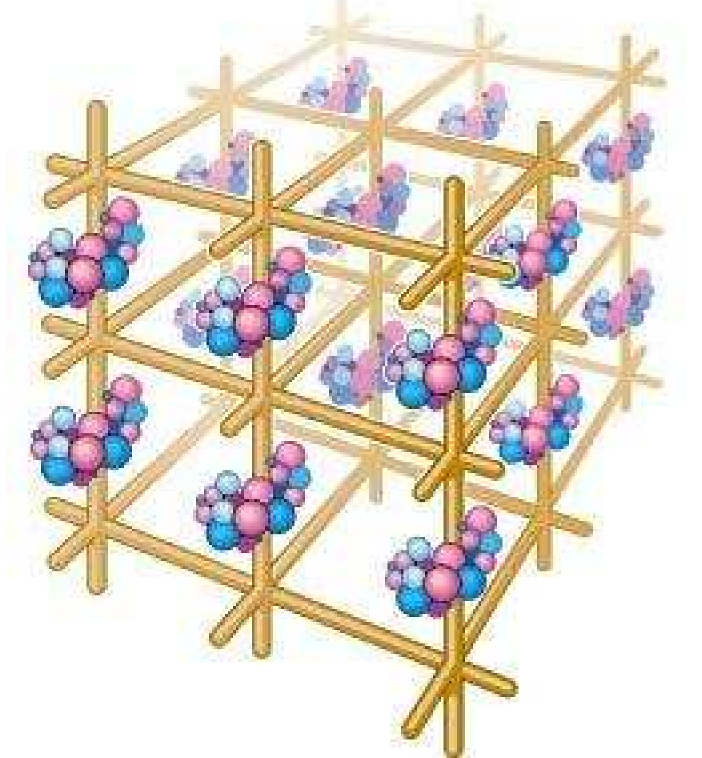
M. C. Eschers Holzschnitt »Tiefe« inspirierte den Autor, ein räumliches Molekülgitter aus einer Reihe sechsarmiger Verknüpfungspunkte zu konstruieren.

Kristalle. Die Größe der Grundelemente gab die Maschenweite vor. Obwohl jeder Verzweigungspunkt für sich genommen weich und beweglich ist, bilden vier davon an den Ecken eines Parallelogramms in einem solchen Gitter eine starre Verbindung.

Es genügt allerdings nicht, Strukturen mit großem Aufwand im Labor erzeugen zu können. Von zentraler Bedeutung für die Nanotechnologie sind molekulare Maschinen. Auch hier hat sich die Erbsubstanz mittlerweile als sehr nützlich erwiesen. Der Mechanismus, nach dem zwei unserer Maschinen funktionieren, ist wiederum der Natur entlehnt: eine Änderung in der Konformation der DNA.

Das Molekül liegt normalerweise als rechtshändige Helix vor (das entspricht dem Drehsinn einer Wendeltreppe, die man mit der linken Hand am inneren Geländer und der rechten Hand am äußeren hinaufgeht). Diese so genannte B-DNA ist energetisch gesehen in der typischen wässrigen Umgebung des Moleküls die bevorzugte Struktur. Doch je nach Basensequenz und Chemie der Lösung existieren davon durchaus Varianten. Eine davon ist die linkshändige Z-DNA, die 1979 von Alexander Rich und seinen Kollegen am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge charakterisiert wurde (siehe Bild S. 85).

Zunächst scheint diese Strukturvariante nicht sonderlich wahrscheinlich, denn im DNA-Rückgrat gibt es stets negativ geladene Phosphatgruppen, und die kommen sich in der Z-Struktur recht nahe. Die Ladungen müssen deshalb gegeneinander abgeschirmt werden, was in wässriger Lösung entweder über eine hohe Konzentration an Salzen oder bei ▷



JEN CHRISTIANSEN

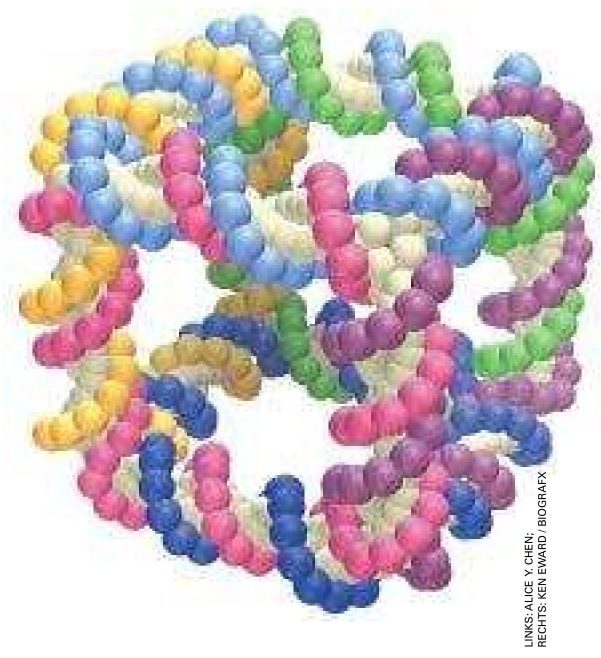
Davon träumen die Kristallografen: Makromoleküle (Kugeln) wie Proteine werden in ein Gitter eingebaut und somit für die Strukturanalyse fixiert. DNA, nach Escher-Art verknüpft, wäre für solche Netzwerke vermutlich ein idealer Baustoff. Auch optische Halbleiter ließen sich auf solche Weise realisieren.

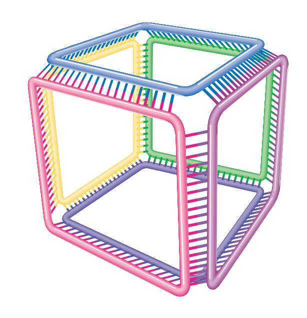
viel geringeren Konzentrationen durch Zugabe spezieller Substanzen erreicht werden kann. Überdies wird zur Bildung von Z-DNA meist eine Sequenz benötigt, die abwechselnd die Basen Cytosin und Guanin enthält. Über deren Position auf dem DNA-Molekül lässt sich also kontrollieren, wo der B-Z-Übergang stattfinden soll; durch Steuerung der Umgebungsbedingungen bestimmen wir das »Wann«.

Mit meinen Kollegen Weiqiong Sun und Zhiyong Shen Mao von der Universität New York stellte ich ein Bauelement aus zwei DX-Molekülen her, die über einen Doppelhelix-DNA-Stab miteinander verbunden sind. In seiner Mitte liegt die fragliche Sequenz; sie umfasst 20 Basenpaare. Unter Normalbedingungen nimmt das gesamte Bauelement die B-Form an und die beiden DX-Moleküle liegen auf derselben Seite der Stabachse. In Gegenwart entsprechender Agenzien aber wandelte sich der mittlere Teil des Stabs in die Z-Form um. Dadurch drehte sich ein DX-Molekül um 3,5 Windungen und wanderte somit um die Stabachse herum. Wurde die hilfreiche Substanz entfernt, nahm das Gesamtmolekül wieder seine ursprüngliche Gestalt an.

Dieses B-Z-Maschinenelement ist recht robust, hat jedoch einen kleinen Nachteil. Würde man mehrere davon in eine Superstruktur einlagern, etwa in eines der oben geschilderten Gitter, stünden nur zwei Zustände zur Verfügung: Entweder wären alle Elemente im B- oder alle im Z-Zustand. Um sie einzeln zu kontrollieren, wären unabhängige Auslöser des Strukturübergangs vonnöten. Das Wundermolekül DNA bietet derlei natürlich auch: Verschiedene Basensequenzen können als Steuerelemente dienen.

Dieser Würfel aus sechs DNA-Schlaufen demonstrierte die Machbarkeit dreidimensionaler DNA-Strukturen (das Rückgrat jedes Strangs ist eingefärbt, Basen erscheinen als weiße Kugeln). Das Schema unten zeigt die Verknüpfung der einzelnen Stränge.





LINKS: ALICE Y. CHEN; RECHTS: KEN EWARD / BIOGRAFX

Gemeinsam mit Hao Yan, jetzt an der Duke Universität, und meinen Kollegen Shen und Xiaoping Zhang von der Universität New York entwarf ich ein System, das seine Form beim Andocken unterschiedlicher DNA-Stränge ändert. Es besteht im Prinzip aus zwei parallelen DNA-Doppelhelices, die in einem zentralen Bereich jeweils nur einen ungepaarten Strang enthalten; dort überkreuzen sie sich.

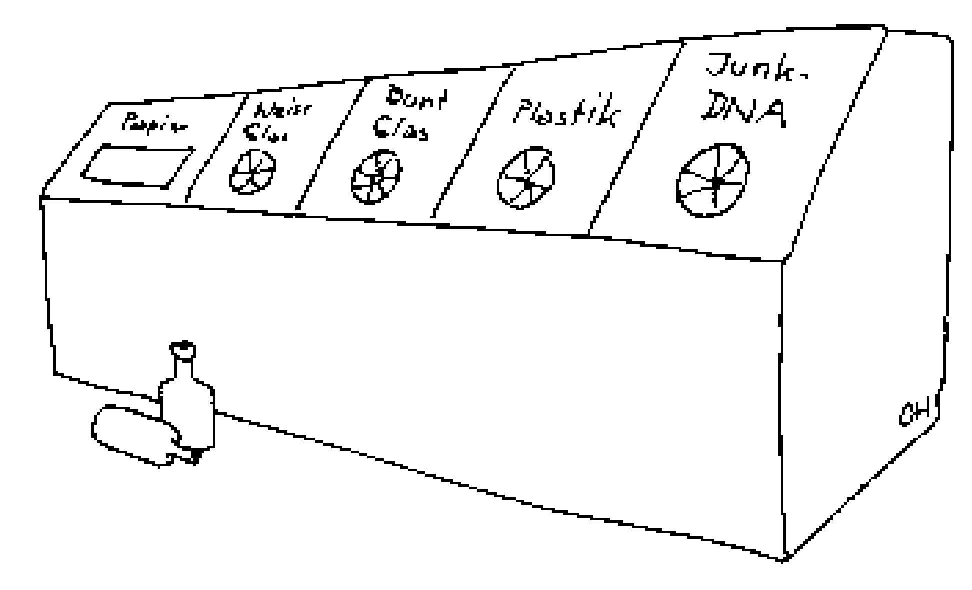
Die nanoskopische Pinzette

Lässt man nun komplementäre Sequenzstücke in dieser Zone ankoppeln, ergeben sich je nach Zusammensetzung zwei verschiedene Gesamtstrukturen (siehe Grafik im Kasten rechts): Im Zustand JX (*juxtaposed*, nebeneinander gelegt) kommen die beiden zusammengehörenden Doppelhelix-Abschnitte auf die gleiche Seite zu liegen, in PX (»paranemische Überkreuzung«) auf gegenüberliegenden. Zwischen beiden Konformationen konnten wir durch Zugabe der entsprechenden Steuersequenzen *(set strands)* zur Lösung hin- und herschalten.

Allerdings muss man zunächst immer erst einen schon gebundenen Schaltstrang entfernen. Bernard Yurke und seine Kollegen bei Lucent Technologies konnten im Jahr 2000 zeigen, dass sich ein Strang aus DNA entfernen lässt, wenn sein vollständiger Komplementärstrang dazukommt. Damit das auch funktioniert, haben unsere Schaltstränge kurze Enden, die nicht zu den Basensequenzen der Maschine passen und sich somit nicht paaren. Geben wir einen vollständigen Komplementärstrang in die Lösung, so bindet er sich erst an das ungepaarte Ende und pellt dann den Rest des Schaltstranges aus dem Element heraus.

Mit dieser Technik konnten wir die Doppelhelices beliebig vorwärts oder rückwärts drehen, ja sogar mehrere PX-JX-Bauelemente betreiben, die sich im Überkreuzungsbereich unterschieden. Wir stellten auch eine lange Kette aus solchen Modulen her und banden große trapezförmige DNA-Strukturen daran. Das Kraftmikroskop verriet uns: Waren alle Elemente im PX-Zustand, dann lagen diese Trapezoide auf derselben Seite der Kette, im JX-Zustand hingegen abwechselnd links und rechts.

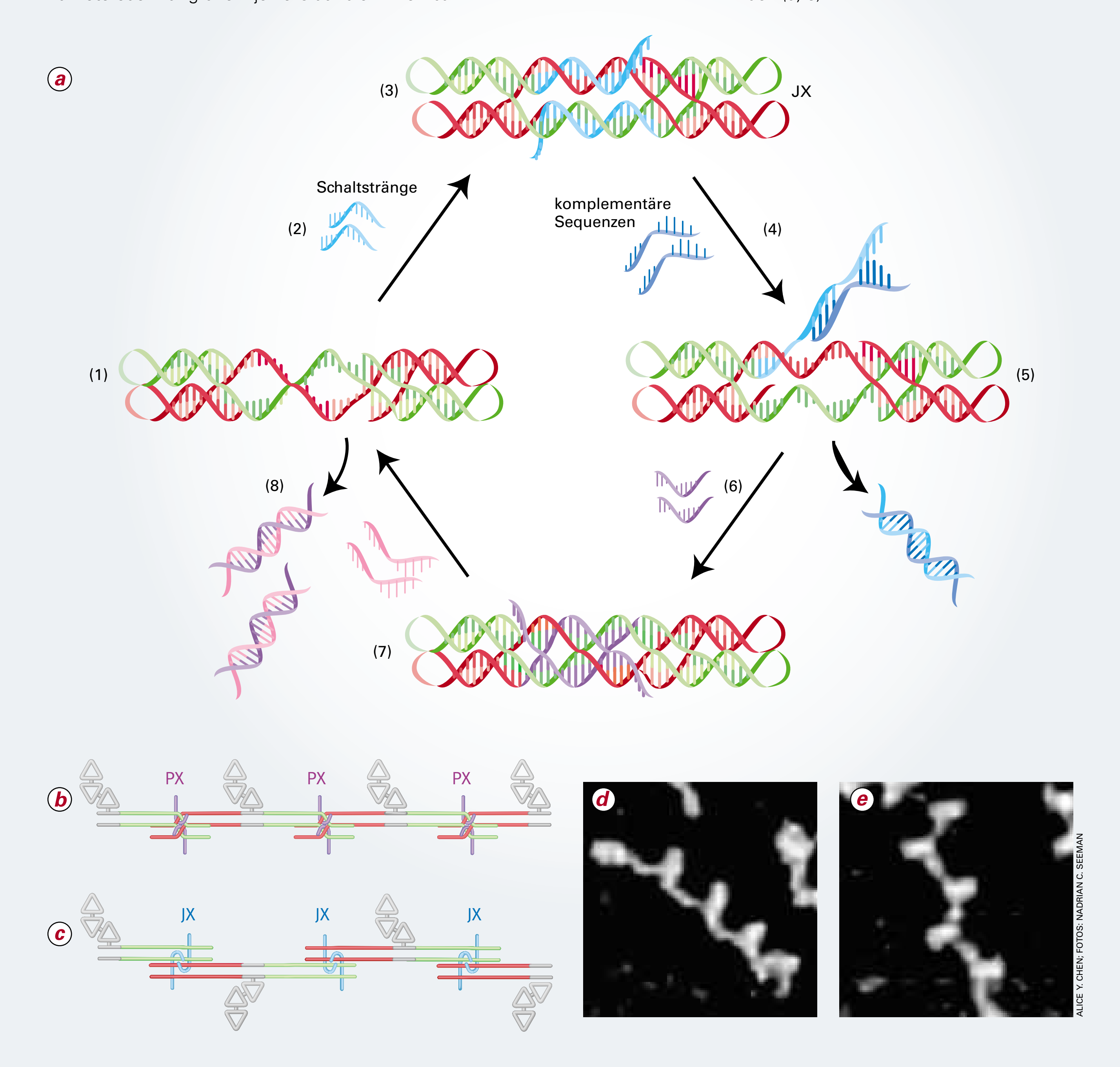
Vor etwa fünf Jahren konstruierten Yurke und seine Kollegen aus drei DNA-Strängen eine nanoskopische Pinzette. Schaltstränge, von Yurke Treibstoffstränge *(fuel strands)* genannt, öffneten und schlossen die Greifer. Andere Forschungsgruppen nutzten ähnliche Me-

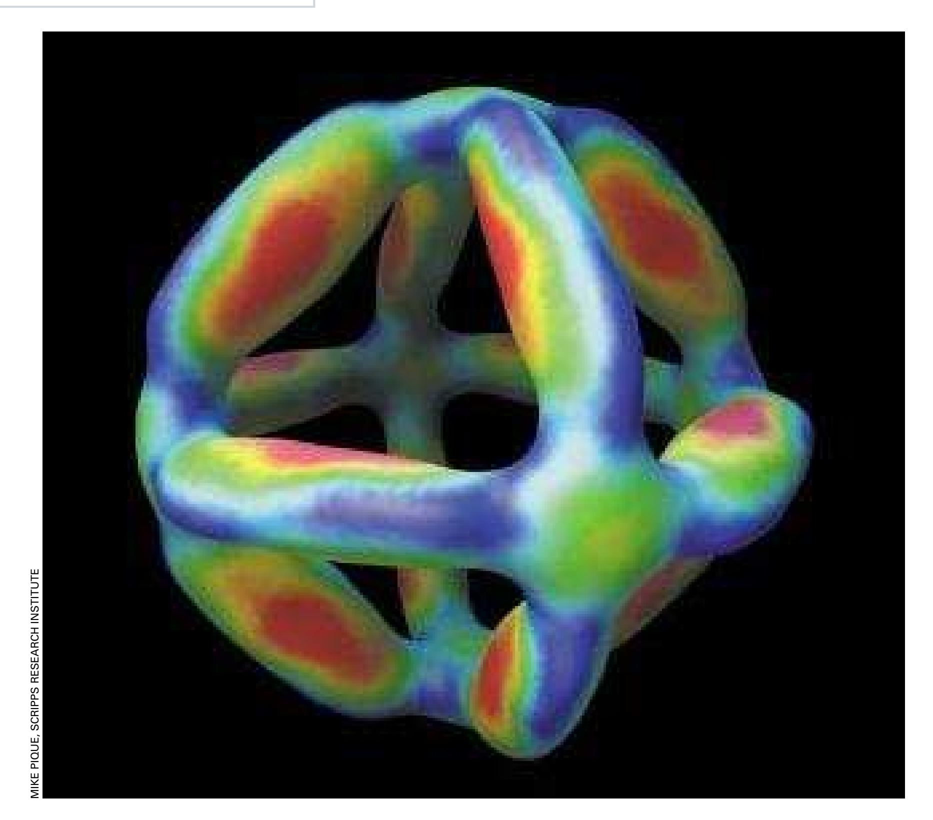


Der molekulare Schalter

Ein individuell kontrollierbares DNA-Maschinenelement lässt sich durch Zugabe oder Entfernen spezifischer DNA-Stränge zwischen zwei Zuständen umschalten (*a*, Schritt 1 bis 8). Das Bauelement selbst besteht aus vier Doppelhelix-Abschnitten mit zwei ungepaarten DNA-Strängen als Brücke (1). Werden die hellblauen Schaltstränge zugegeben (2), so binden sie sich an die ungepaarten Sequenzen so, dass zusammengehörende Helices – nur rote oder nur grüne – jeweils auf dieselbe Seite zu liegen kommen (*doubly juxtaposed*, JX) (3). Gibt man zu den Schaltsträngen komplementäre Sequenzen zu, so werden Erstere wieder abgelöst (4), und das Bauelement kehrt in den Ausgangszustand zurück (5). Die purpurfarbenen anderen Schaltstränge (6) zwingen das Element dann in die paranemische Crossover-Konfiguration PX (7), mit unterschiedlichen Helices zwischen oben und unten. Auch dieser Zustand ist umkehrbar.

Den Beweis für das Funktionieren dieses Maschinenelements lieferte eine trickreiche Erweiterung. Mehrere Exemplare wurden in einer Kette angeordnet und zusätzlich große trapezoide DNA-Stücke als Marker angebracht. Waren alle Module im PX-Zustand *(b)*, befanden sich alle Trapezoide auf derselben Seite, andernfalls abwechselnd links und rechts *(c)*. Dieses Verhaltensmuster konnte mit dem Kraftmikroskop präzise nachgewiesen werden *(d, e)*.





MIKE PIQUE, SCRIPPS RESEARCH INSTITUTE

Dieses Oktaeder entstand aus einem langen DNA-Strang und fünf kurzen Helfer-Strängen. Jeder »Stab« setzte sich aus zwei parallelen, miteinander verbundenen Doppelhelices zusammen. Dieses Bild wurde aus einer elektronenmikroskopischen Aufnahme von mehr als 600 Oktaedern rekonstruiert. Die Farben stehen für die relative Elektronendichte (zunehmend von blau nach rot).

thoden, um die Aktivität von Ribozymen einzuschalten. Das sind Enzyme aus RNA, einem der DNA ähnlichen Molekül. Schon 1998 zeigten Michael P. Robinson und Andrew D. Ellington, beide an der Universität von Texas in Austin, dass die Aktivität eines Ribozyms um den Faktor 10 000 erhöht werden kann, wenn man einen geeigneten Schaltstrang hinzugibt, um die Konformation gezielt zu ändern.

Der erste Schritt zur Nanofabrik

Ein entscheidendes Ziel in der auf DNA basierenden Nanotechnologie besteht darin, die in zwei Dimensionen erzielten Erfolge auf drei Dimensionen auszudehnen. Dann ließen sich feste Werkstoffe aufbauen, indem man eine Reihe DNA-Sequenzen spezifiziert und miteinander kombiniert. Befinden sich die Systeme in einem Zustand hoher Ordnung, so lassen sich auch die angestrebten kristallografischen Experimente durchführen, bei denen die zu untersuchenden Moleküle in einem regelmäßigen Gitter platziert werden.

Ein weiteres Ziel ist, DNA-Elemente dort einzubauen. Damit wäre der erste Schritt zur Nanofabrik getan, mit einer Vielzahl struktureller Zustände, die eine Art Fließband realisieren könnten. Mit ähnlichen Bauelementen ließen sich neue Werkstoffe mit hoher Präzision fertigen. Als Prototyp stellten meine Kollegen James W. Canary, Philip S. Lukeman und Lei Zhu (jetzt Universität von Texas) mit mir ein kleines Stück Nylon auf einem Nukleinsäurerückgrat her. Es ist zu erwarten, dass wir eines Tages neue Polymere mit spezifischen Eigenschaften und Topologien produzieren werden.

Die DNA wird die Basis solcher Entwicklungen sein, kommt aber ohne elektronische Komponenten wie metallische Nanopartikel oder Kohlenstoff-Nanoröhren nicht aus. Angesichts der großen Unterschiede im chemischen Verhalten all dieser Moleküle wird eine solche Kombination keine einfache Aufgabe sein. Und selbst wenn man Nanoelektronik mit sich selbst organisierender DNA konstruieren könnte, so müssten die Nanomaschinen schließlich mit der makroskopischen Welt in einer weitaus raffinierteren Weise wechselwirken als durch Zugeben oder Entfernen von Schaltsträngen in einer Lösung. Das ist eine ungeheure Herausforderung.

Der Traum der Nanotechnologen wäre eine Maschine, die sich selbst replizieren kann. Anders als für lineare DNA ist das für verzweigte nicht einfach. Jedoch gelang Ende 2003 William M. Shih, Joel D. Quispe und Gerald F. Joyce vom Scripps-Forschungsinstitut in La Jolla (Kalifornien) ein erster Schritt in dieser Richtung. Aus einem etwa 1700 Basen langen DNA-Strang bauten sie ein Oktaeder, wobei sie fünf kurze Hilfsstränge zur Vollendung der Konstruktion nutzten (siehe Bild links). Jede Kante bestand aus zwei miteinander verknüpfen DNA-Doppelhelices – einer Serie von DX- und PX-Molekülen. Die Kanten sind jeweils rund 14 Nanometer lang, was vier Windungen einer Doppelhelix entspricht.

Ein gefaltetes Oktaeder kann sich zwar nicht von alleine reproduzieren. Aber im ungefalteten Zustand lässt sich der gesamte Strang leicht mit Hilfe der Polymerase-Kettenreaktion millionenfach vervielfältigen, einem Standardverfahren der Biotechnologie. Das ist zwar immer noch weit weg von der Replikation, die jeder lebendige Organismus zu Stande bringt. Doch wenn das hundertjährige Jubiläum der Entdeckung von Watson und Crick naht, dürfte es Maschinen auf DNA-Basis geben, die das genauso gut können. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Der Kristallograf **Nadrian C. Seeman** von der Universität New York suchte nach einer Möglichkeit, mittels DNA-Gitter Makromoleküle besser untersuchen zu können. Mittlerweile setzt er seine Konzepte in allen Bereichen der Nanotechnologie ein.

A 1.7-kilobase single-stranded DNA that folds into a nanoscale octahedron. Von William M. Shih, Joel D. Quispe und Gerald F. Joyce in: Nature, Bd. 427, S. 618, 12. Februar 2004

DNA as an engineering material. Von Andrew Turberfield in: Physics World, Bd. 16, Heft 2, S. 43, März 2003

DNA in a material world. Von Nadrian C. Seeman in: Nature, Bd. 421, S. 427, 23. Januar 2003

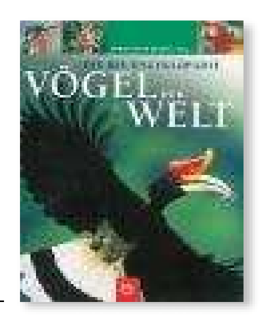
Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ZOOLOGIE

Christopher Perrins (Hg.)

Die BLV Enzyklopädie Vögel der Welt

Aus dem Englischen von Einhard Bezzel et al.; Bearbeitung der deutschen Ausgabe durch Einhard Bezzel. BLV, München 2004. 656 Seiten, € 49,90



Die Leidenschaft für die Beobachtung von Vögeln in der freien Natur nahm im 19. Jahrhundert in Nordamerika ihren Anfang und breitete sich dann wie ein Lauffeuer in der ehemaligen Kolonialmacht Großbritannien aus; das Gewehr als bevorzugtes Mittel der Wechselwirkung mit Vögeln wurde nach und nach durch das Fernglas ersetzt. Als besonders folgenschwer erwies sich der harsche Winter 1890/91; die Viktorianer entdeckten ihr Mitgefühl für die unter der Kälte leidenden geflügelten Mitgeschöpfe und legten zum ersten Mal im großen Maßstab in ihren Gärten Futter aus. Die unmittelbare Gegenwart der Vögel ließ das Interesse weiter steigen, und an der Wende zum 20. Jahrhundert war die Vogelbeobachtung zu einer weit verbreiteten Freizeitbeschäftigung geworden.

Die britische Vogelliebhaberei offenbart sich heute nicht nur in den Abertausenden von so genannten *twitchers*, die jedes Wochenende die Landschaft durchstreifen und nach Raritäten Ausschau halten, ambitionierteren Amateuren, die jedes Jahr zuverlässig die Verbreitung von Arten und Nestern dokumentieren, und den Unmengen an Futter, die jeden Winter in den Gärten verteilt werden und sogar das Zugverhalten von Vögeln beeinflussen. Sie ist auch Ursache einer überaus lebendigen akademischen Tradition, die maßgeblich dazu beigetragen hat, dass viele Vogelarten zu Modellsystemen für zahlreiche interessante biologische Phänomene geworden sind. So dienten die Meisen von Wytham Woods in der Nähe Oxfords dazu, grundlegende Fragen zur Brutbiologie und zu den Folgen des Klimawandels zu beantworten.

Das vorliegende Werk ist ein Produkt dieser fruchtbaren Symbiose von Liebhaberei und akademischer Neugierde, kombiniert mit der so typisch britischen Kunst, solideste und anspruchsvolle Wissenschaft ohne unnötigen Jargon auf lesbare und unterhaltsame Weise darzustellen.

Die schwergewichtige Enzyklopädie wählt einen Mittelweg zwischen Bestimmungsbüchern, die meist nur wenig zur Stammesgeschichte, zur Ökologie und zum Verhalten bieten, und Artmonografien, die nur selten größere stammesgeschichtliche und ökologische Zusammenhänge darstellen. Der Schwerpunkt des Bands liegt aus Platzgründen nicht auf einzelnen Arten, sondern auf der Ebene der Familie.

Fruchtbare Symbiose von Liebhaberei und akademischer Neugier

Die Systematik und Stammesgeschichte der Vögel ist ständigen Revisionen unterworfen. Perrins und seine Mitarbeiter haben daher einen konservativen Weg gewählt. Die Autoren folgen nicht dem modernen Trend, althergebrachte Familien zu artenreichen Großfamilien zusammenzuschließen, zeigen aber Sympathie für Versuche, die stammesgeschichtlichen Beziehungen zwischen Familien neu zu definieren. Dank dieser Strategie findet der Leser vertraute Gruppen ohne Weiteres wieder; gleichwohl werden ihm neue Ideen zur Stammesgeschichte nicht vorenthalten.

Nach kurzen und trotzdem informativen einleitenden Kapiteln zum Körperbau, zur Physiologie und zur Evolution der Vögel werden Ökologie, Nahrung, Verbreitung und das Sozial- und Brutverhalten jeder einzelnen Vogelfamilie von einem illustren Team internationaler Ornithologen auf der Grundlage neuester Erkenntnisse dargestellt. Kurze, farblich abgesetzte Steckbriefe fassen die wichtigsten Informationen zu jeder der 172 Familien zusammen. Die Beschreibungen werden durch zahlreiche ein-



Beim Eintauchen schließt der Eisvogel die Nickhaut seiner Augen. Über den Tastsinn muss er den richtigen Moment zum Zuschnappen finden (links). Der ungewöhnliche halbmondförmige Kamm des Cayenneklippenvogels spielt bei der Balz eine zentrale Rolle.

drucksvolle Fotografien von Vögeln in ihrem natürlichen Lebensraum, durch detaillierte Zeichnungen repräsentativer Arten aus jeder der vorgestellten Familien und durch Verbreitungskarten ergänzt. Vertiefende Darstellungen, beispielsweise zur sexuellen Auslese, zur Biologie des Nahrungserwerbs oder zu den erstaunlichen kognitiven Fähigkeiten von Krähen und Hähern, ergänzen den systematischen Überblick und geben dem Leser einen hervorragenden Einblick in den aktuellen Forschungsstand.

Einige Schwächen sind bei einem Werk dieses Umfangs fast unvermeidlich. So wird in der Enzyklopädie völlig auf die Abbildung von Stammbäumen verzichtet. Das ist wenig sinnvoll, denn Stammbäume stellen nicht nur in sehr intuitiver Weise die evolutionären Beziehungen zwischen taxonomischen Gruppen dar, sie liegen auch für viele Familien und Ordnungen in zuverlässiger Form vor und dienten als Grundlage für die rigorosen vergleichende Studien, die in den vergangenen Jahren die Erforschung der evolutionären Ökologie von Vögeln revolutioniert haben.

Auch das Literaturverzeichnis ist ein wenig kurz geraten und beschränkt sich hauptsächlich auf regionale Führer und Monografien von Artengruppen. Besonders Biologiestudenten hätten von einem ausführlicheren Verzeichnis mit grundlegenden Übersichtsarbeiten zur Ökologie und Verhaltensbiologie profitieren können, ohne dass die Gesamtlänge des ohnehin umfangreichen und großformatigen Bandes viel zugenommen hätte. Und viele begeisterte Vogelliebhaber hätten vielleicht gerne auch eine Checkliste aller ungefähr 9800 Vogelarten gesehen.

Diesen Einwänden zum Trotz bietet das Werk einen würdigen und vor allem preiswerten Ersatz für das großartige, auf zwölf Bände angelegte und inzwischen bei Band 9 angelangte »Handbook of the Birds of the World« (Lynx Edicions, Barcelona). Einhard Bezzel und sein Stab von Übersetzern haben mit ihrer deutschen Bearbeitung hervorragende Arbeit geleistet.

Jedem Vogelliebhaber – ob Student, Wissenschaftler oder Amateur – kann Christopher Perrins' Enzyklopädie vorbehaltlos empfohlen werden.

Thomas P. Weber

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Tierökologie der Universität Lund (Schweden) und Buchautor.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Klaus Sander (Hg.)
Max Planck
Wissenschaft und Leben
2 CDs mit Originaltonaufnahmen, Booklet, 24 Seiten.
supposé, Köln 2003, € 24,80

Wer sich für die Geschichte der Physik und die Person Max Plancks interessiert, dürfte sich darüber freuen, dass das elegant aufgemachte CD-Set die Stimme einer der großen Gestalten der Physik wieder hörbar macht.

Die Aufnahmen aus den Jahren 1936 bis 1945 sind zumeist Radiovorträge über Sinn und Wesen der Wissenschaft, insbesondere der Physik, und ihr Verhältnis zu Technik, Philosophie und Religion. Daneben finden sich eine über 20-minütige »Selbstdarstellung« aus einem Filmporträt von 1942, zwei kurze Interviews aus den letzten Lebensjahren Plancks und als besonderes Schmankerl ein Mitschnitt der Festsitzung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zu seinem 80. Geburtstag.

Aus der Rezension von Alexander Pawlak

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Hörspaß	■■■■■
Didaktik	■■■■
Science-Grad	■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	22

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**

Preisausschreiben

Auf der Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft in Köln, im September 2005, wird erstmals der

Hanno und Ruth Roelin-Preis
für Wissenschaftspublizistik

vergeben. Mit diesem Preis wird ein(e) Wissenschaftler(in) oder ein(e) Wissenschaftspublizist(in) ausgezeichnet, der/die **neue Erkenntnisse aus der Astronomie und Weltraumforschung** einer breiteren Öffentlichkeit besonders erfolgreich vermittelt hat. Es können auch in didaktisch-pädagogischer Absicht verfasste Darstellungen ausgezeichnet werden. Es sind Publikationen aller Art zugelassen (Druck, Rundfunk, Fernsehen, Internet ...).

Der Preis wird vom Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg vergeben. In der Jury, die zu jeder Preisverleihung neu einberufen wird, sind sowohl Wissenschaftler als auch Wissenschaftspublizisten vertreten. In diesem Jahr beträgt das **Preisgeld 3000 Euro**. Die Arbeit des Preisträgers/der Preisträgerin wird den Lesern von »Sterne und Weltraum« in angemessener Form vorgestellt werden.

Es sind sowohl Eigenbewerbungen als auch Vorschläge von Dritten möglich. Bitte senden Sie Ihre Bewerbung bzw. Ihren begründeten Vorschlag an:
Dr. Jakob Staude, Redaktion Sterne und Weltraum, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg.
Einsendeschluss: 15. April 2005.



Warum fallen Vögel im Schlaf nicht vom Baum?

WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Bernhard Schulz, Antje Wegener, Carola Zinner

Warum ist der Himmel blau?

Kinder fragen, Eltern rätseln

Rowohlt, Berlin 2003. 158 Seiten, € 16,90

Warum hat das Zebra Streifen? Wie funktioniert ein Mobilfunknetz? Mit diesen und ähnlichen Fragen schaffen es Kinder immer wieder, ihre Eltern zur Verzweiflung zu bringen. Denn bei genauerem Hinsehen sind die Fragen und erst recht die Antworten gar nicht so einfach. Aber nun ist für Abhilfe gesorgt.

Bernhard Schulz, Antje Wegener und Carola Zinner haben aus ihren Beiträgen für den Kinder- und Schulfunk des Bayerischen Rundfunks ein Buch gemacht. Um die – häufig gestellte – Titelfrage und die vielen anderen Kinderfragen zu beantworten, haben sich die Autoren an Experten gewandt und sich die Sachverhalte immer und immer wieder erklären lassen. Das Ergebnis sind bis zu zwei Seiten lange, gut lesbare und verständliche Antworten, die trotz ihrer Kürze richtig sind und Lust zum Weiterlesen machen.

Die bunten Illustrationen von Sybille Hein lockern die zahlreichen Fragen und Antworten auf. Die Themen reichen von Mensch und Tier über Pflanzen bis hin zu Technik und Erfindungen.

Da nicht alle Erwachsene wissen, warum die Vögel im Schlaf nicht vom Baum fallen oder wer den Urwald düngt, ist das Buch eine spannende Lektüre für alle Altersklassen, bei der auch die Großen noch eine Menge dazulernen können.

Monika Maintz

Die Rezensentin ist promovierte Astronomin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



KOSMOLOGIE

Marcus Chown

Das Universum nebenan

Revolutionäre Ideen in der Astrophysik

Aus dem Englischen von Susanne Aeckerle.
Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2003. 240 Seiten, € 15,–

Stellen Sie sich vor, Sie sind tot, aber gleichzeitig lebendig. Oder umgekehrt lebendig, während Sie doch eigentlich tot sind. Verrückt? Ja und nein, und das ganz sicher. Marcus Chown, Wissenschaftsjournalist und Berater für Kosmologie bei der Zeitschrift »New Scientist«, präsentiert in seinem Buch fantastische Ideen für eine Reihe ungelöster Rätsel der modernen Physik.

Lebendig und tot zugleich, das ist nach der Tradition Schrödingers Katze, aber es könnte ein Mensch sein wie Sie und ich. Die Geschichte illustriert, wie die Unbestimmtheit im mikroskopisch Kleinen, die für die Quantenmechanik charakteristisch ist, auf makroskopische Gegenstände durchschlägt. Im Großen dagegen gilt die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins, in der so exotische Objekte wie Schwarze Löcher vorkommen. Beide Theorien sind äußerst erfolgreich. Kein CD-Player oder Computer würde ohne die Erkenntnisse der Quantenmechanik funktionieren, und ohne Relativitätstheorie würden Raumsonden vom vorausberechneten Kurs abkommen.

Dennoch sind beide unvollständig. Der kontinuierliche Übergang vom sehr Kleinen zum sehr Großen misslingt: Es existiert bis heute keine einheitliche Theorie, die sowohl die Quantenmechanik als auch die Relativitätstheorie umfasst.

In diesem Buch erzählt Marcus Chown mit viel Schwung, welche neuen, ungewöhnlichen Ideen Physiker sich dazu einfallen ließen. Vielleicht gibt es unendlich viele Realitäten, die sich gegenseitig beeinflussen können. Elementarteilchen falten möglicherweise die vierdimensionale Raumzeit so stark, dass Zeitschleifen entstehen. Dann könnten sie auch von Ereignissen in der Zukunft beeinflusst werden. Zumindest könnte das eine Erklärung für die Unschärfen in der Quantenmechanik sein.

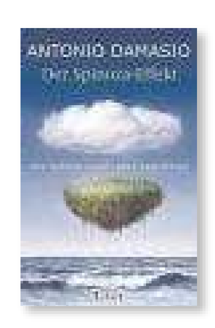
Über die Frage nach außerirdischem Leben führt Chown den Leser zur Idee vom Multiversum. Unzählige Universen existieren dabei nebeneinander, diesmal ohne sich gegenseitig zu beeinflussen, jedes mit seinem eigenen Satz an Naturkonstanten. Ist unser Universum von einer hyperintelligenten Rasse erschaffen worden, mit der Absicht, darin Leben zu ermöglichen? Oder ist es unter den unzählig vielen Universen rein zufällig das einzige, das Leben hervorbringen konnte? Beides könnte eine Erklärung dafür sein, warum die Naturkonstanten so fein aufeinander abgestimmt sind, dass Leben, so wie wir es kennen, möglich ist.

Manche der vorgestellten Spekulationen werden sich in Luft auflösen, andere bieten möglicherweise den Schlüssel für völlig neue, tiefer liegende Erkenntnisse. Die Geschichte der Physik zeigt immer wieder, dass manche Idee, die zunächst für abwegig gehalten wurde, letztlich zu einem grundlegend besseren Verständnis unserer Welt führte.

Das Buch ist spannend und verständlich geschrieben. Es macht Spaß. Aber bevor Sie es lesen, sollten Sie Ihren gesunden Menschenverstand zu einem netten Spaziergang überreden. Er würde Ihnen nur allzu oft im Wege stehen.

Hans Zekl

Der Rezensent ist promovierter Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Attendorn.



NEUROWISSENSCHAFTEN

Antonio Damasio

Der Spinoza-Effekt

Wie Gefühle unser Leben bestimmen

Aus dem Englischen von Hainer Kober. List, München 2003. 392 Seiten, € 24,90

Das Wissen um die eigenen Emotionen und Gefühle ist zentral für das Bemühen, ein zufriedenes Leben zu führen. Dies ist die zentrale These von Antonio R. Damasios neuem Buch, das sich ganz der Frage nach Herkunft, Entstehung und Funktion von Emotion und Gefühl widmet. Wie in seinen beiden Vorgängerwerken »Descartes' Irrtum« (1997) und »Ich fühle, also bin ich« (2000) verbindet der bekannte Neurologe von der Universität von Iowa die Ergebnisse der modernen Neurowissenschaften mit philosophischen Konzeptionen.

Was geschieht im Gehirn, wenn – wie William Wordsworth (1770–1850) es poetisch ausdrückt – »Empfindungen, die angenehm, die ich im Blut, ums Herz gefühlt, gar Eingang fanden ins Gemüt«? Damasio liefert als Antwort einen Zwischenbericht aus der Forschung über das neuronale Korrelat von Emotionen. Noch wichtiger ist ihm aber der Einfluss der Gefühle auf Entscheidungsprozesse, die Steuerung des sozialen Lebens und auf persönliche Lebensumstände.

In dieser Einstellung sieht sich Damasio einig mit dem Philosophen Benedict de Spinoza (1632–1677). Während René Descartes (1596–1650) eine dualistische Auffassung von Körper und Geist vertrat, führt der ebenfalls in den Niederlanden des 17. Jahrhunderts lebende Spinoza beide Instanzen zusammen und unterstreicht in seinem Werk die Bedeutung der Emotionen für die kulturelle und soziale Entwicklung des Menschen. Neben der Bedeutung für die moderne Neurobiologie, die der Autor in Spinozas Werk erkennt, sieht sich Damasio mit ihm beinahe auf eine persönliche Art verbunden. So lebhaft schildert er seinen Besuch in Spinozas Den Haager Haus, dass klar wird: Dieses Buch ist mehr als eine Hommage an den Philosophen, es ist das Protokoll einer fiktiven Begegnung zwischen ihm und Damasio.

Emotion ist ein körperlicher Zustand, Gefühl dessen Wahrnehmung

Zunächst entwickelt der Autor eine eigene Theorie der Emotionen, die auf den Erkenntnissen der Neurowissenschaften und der evolutionspsychologischen Bedeutung von Emotionen basiert. Dabei unterscheidet er Emotionen von Gefühlen: Erstere sind öffentlich und beobachtbar, Letztere subjektiv und mentale Repräsentationen von Körperzuständen im Gehirn. Als Wahrnehmung des körperlichen und gedanklichen Zustands, der einer Emotion entspricht, ist das Gefühl dieser nachgeschaltet. Diese aufwändig betriebene Unterscheidung zwischen Emotion und Gefühl ist schwierig nachzuvollziehen und entbehrt jeder empirischen Grundlage.

Andererseits verspricht Damasio dem Leser aber auch keine streng wissenschaftliche Abhandlung. Vielmehr ist hier das Buch und nicht das Labor das experimentelle Setting; schreibend führt Damasio dem Leser die Entwicklung seiner Gedanken vor und ermöglicht es ihm, Hypothesen testend die Verbindung zwischen philosophischen Ideen des 17. Jahrhunderts und moderner Neurowissenschaft nachzuvollziehen. Auch die Idee der Trennung von Emotion und Gefühl ist letztlich an Spinoza angelehnt, der den Geist (das Gefühl) als Idee des Körpers (der Emotion) auffasst.

Die Entwicklung von Emotion und Gefühl verläuft etwa folgendermaßen: Ein erinnerter oder in der Umgebung auftauchender emotional besetzter Reiz wird in den sensorischen Verarbeitungssystemen des Gehirns bewertet und löst in den emotionsauslösenden Hirnregionen (zum Beispiel in der Amygdala im limbischen System oder im ventromedialen präfrontalen Kortex) eine Reaktion aus. Von dort aus projizieren Nervenbahnen zu den Regionen, die Emotionen ausführen: zum Hypothalamus, zum basalen Vorderhirn (zum Beispiel dem als Lustzentrum bezeichneten Nucleus accumbens) oder zu Hirnstammkernen, die für die Bewegung von Gesicht, Zunge, Rachen und Kehlkopf verantwortlich sind. So wird eine komplexe Kaskade von mit dieser Emotion verbundenen Prozessen – physiologischen Veränderungen, spezifischen Verhaltensweisen – in Gang gesetzt. Gleichzeitig verändern sich mentale Prozesse, und es entsteht ein Gefühl als Re- ▷

PREISRÄTSEL

Das Kuckucksei

Von Paul von der Heyde

Das Gelege von Kubienchen, einem Muttertier der Spezies *Cubusphila ovolixa*, besteht aus zwölf geraden Stabeiern der Länge 1 und der Dicke 0. Diese werden bei der Brutpflege übersichtlich zu einem Kantenmodell eines Würfels verklebt. Kubienchen meint dies eben artgerecht erledigt zu haben und betrachtet zufrieden ihr Werk. Vorsichtshalber überprüft sie noch einmal alles:

- 6 ebene Flächen, die den Innenraum vollständig umschließen,
- 12 gerade Kanten,
- 8 Ecken, und von jeder Ecke gehen genau drei der Kanten aus.

Alles stimmt.

Und so übersieht Kubienchen, dass der hinterlistige *Cuculus mutabor* heimlich eines ihrer Eier entfernt und ein eigenes Stabei abweichender Länge untergeschoben hat.

Wie lang ist das Kuckucksei?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Holzbausätze »Riesenrad«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. Januar 2005, eingehen.

Lösung zu »Alles im Eimer?« (November 2004)

Es sind 11 Fahrten der Eimer nötig, um Alois (A), Bernd (B), Christa (C) und den Werkzeugkasten (W) wohlbehalten auf den Boden zu bringen. Karl Götz aus Tübingen entschied sich für die unten dargestellte Variante.

Bei allen Lösungen des Problems sind die Fahrten 1 und 2 sowie 10 und 11 die gleichen. Dazwischen gibt es Variationsmöglichkeiten: Fahrt 3 kann nach Fahrt 4, Fahrten 5 und 6 nach Fahrt 7 und Fahrt 8 auch nach Fahrt 9 durchgeführt werden. Es gibt also insgesamt 8 Varianten.

Max Kobbert aus Münster verfasste zu einer dieser Varianten ein Gedicht (siehe rechts).

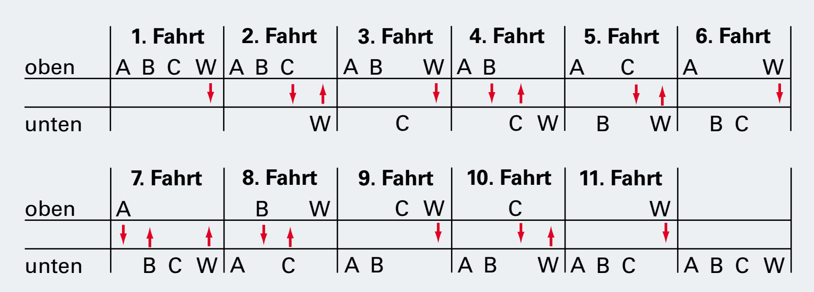
Die Gewinner der fünf Briefbeschwerer »Evolution Mensch« sind Friedrich Hein, Petershausen; Cordula Schickel, Erding; Hella Riede, Tübingen; Jürgen Meier, Braunschweig; und Elisabeth Arnold, Essenbach.

Der Kasten wird hinabgeschickt,
danach auch Christas Abfahrt glückt.
Wenn Christa bleibt im Eimer sitzen,
kann jetzt der Bernd nach unten flitzen.

Der Kasten saust erneut allein
nach unten. Bernd steigt mit hinein,
damit auch Alois, der Dicke,
sanft runterkommt zu seinem Glücke.
Nun kommt der Kasten wieder dran,
fällt solo ohne Frau und Mann.

Die Christa in den Eimer steigt,
der sich mit ihr nach unten neigt,
wieder aber wieder hochgezogen
durch Bernd, der etwas mehr gewogen.

Und wieder fällt der alte Kasten
allein herab mit Werkzeuglasten,
damit zum dritt- und letzten Male
die Christa nutzt die Eimerschale.
Zu dritt beglückwünscht man sich munter,
da knallt der Werkzeugkasten runter.



Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷präsentation der als Emotion beschriebenen Ereignisse. Während Damasio die Entstehung von Emotionen im Gehirn anschaulich und präzise darstellt, bleibt gänzlich unklar, wie und wo die korrespondierenden Gefühle entstehen.

Emotionen spielen eine Rolle bei Entscheidungsprozessen und bei der Bewertung sozialer Situationen im Alltag. Läsionen der Amygdala können zu Gefühlsarmut führen, eine Schädigung frontaler Hirnbereiche führt zu impulsivem, enthemmtem Verhalten. Die Betroffenen sind leicht ablenkbar, vernachlässigen moralische und soziale Prinzipien und neigen zu risikoreichem Verhalten. Hinzu kommt die Unfähigkeit, Handlungen zu planen und durchzuführen, wobei die intellektuellen Fähigkeiten der Betroffenen häufig unbeeinträchtigt sind.

Die Erkenntnis, dass Emotionen unser Sozialverhalten bestimmen und dass dieses bei Läsionen entsprechender Kortexareale eben gestört ist, ist jedoch nicht neu. Neu hingegen ist die Frage, welche Rolle Emotionen bei der Beantwortung persönlicher Lebensfragen spielen. Hier greift Damasio auf die Antwort Spinozas zurück, der eine Art Anforderungskatalog für ethisches und tugendhaftes Verhalten aufstellt. Im Zentrum der Ideen Spinozas steht jedoch die Forderung, eine Toleranz gegenüber den eigenen negativen Emotionen zu entwickeln, indem man zum Beispiel das auslösende Erlebnis in der Vorstellung wiederholt. Hier kommt die Neurowissenschaft ins Spiel, denn um emotionale Prozesse – zum Beispiel bei der Behandlung einer Depression – beeinflussen zu können, muss der Therapeut diese Prozesse kennen.

Auch wenn Damasios neuestes Buch die empirische Forschung nicht durchweg präzise zusammenfasst und eine eher eigenwillige Emotionstheorie bietet, ist es doch eine lebhafte und geistreiche Einführung in das Werk Spinozas. Es gelingt dem Autor, der Suche nach dem neuronalen Korrelat der Emotionen einen philosophischen Sinn zu verleihen. Nicht zuletzt bieten Damasio und Spinoza – der Neurologe und der Philosoph – eine Anleitung für ein zufriedeneres Leben, ermöglicht durch das Wissen um die Herkunft, Entstehung und Funktion von Emotionen. ◁

Miriam Spering

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und promoviert an der Universität Gießen über die Zielselektion bei Augenbewegungen.

Das Kuckucksei

Von Paul von der Heyde

Das Gelege von Kubienchen, einem Muttertier der Spezies *Cubusphila ovolixa*, besteht aus zwölf geraden Stabeiern der Länge 1 und der Dicke 0. Diese werden bei der Brutpflege übersichtlich zu einem Kantenmodell eines Würfels verklebt. Kubienchen meint dies eben artgerecht erledigt zu haben und betrachtet zufrieden ihr Werk. Vorsichtshalber überprüft sie noch einmal alles:

- ▶ 6 ebene Flächen, die den Innenraum vollständig umschließen,
- ▶ 12 gerade Kanten,
- ▶ 8 Ecken, und von jeder Ecke gehen genau drei der Kanten aus.

Alles stimmt.

Und so übersieht Kubienchen, dass der hinterlistige *Cuculus mutabor* heimlich eines ihrer Eier entfernt und ein eigenes Stabei abweichender Länge untergeschoben hat.

Wie lang ist das Kuckucksei?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Holzbausätze »Riesenrad«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. Januar 2005, eingehen.

Lösung zu »Alles im Eimer?« (November 2004)

Es sind 11 Fahrten der Eimer nötig, um Alois (A), Bernd (B), Christa (C) und den Werkzeugkasten (W) wohlbehalten auf den Boden zu bringen. Karl Götz aus Tübingen entschied sich für die unten dargestellte Variante.

Bei allen Lösungen des Problems sind die Fahrten 1 und 2 sowie 10 und 11 die gleichen. Dazwischen gibt es Variationsmöglichkeiten: Fahrt 3 kann nach Fahrt 4, Fahrten 5 und 6 nach Fahrt 7 und Fahrt 8 auch nach Fahrt 9 durchgeführt werden. Es gibt also insgesamt 8 Varianten.

Max Kobbert aus Münster verfasste zu einer dieser Varianten ein Gedicht (siehe rechts).

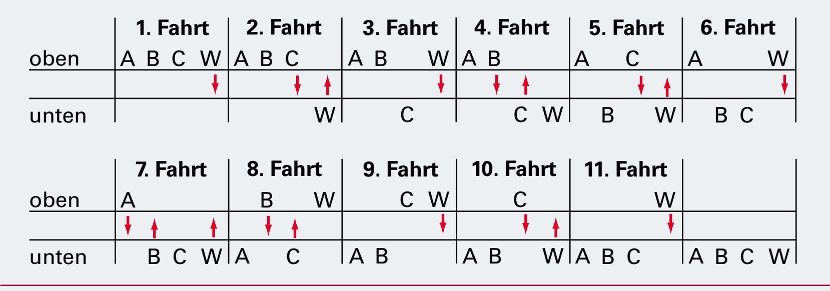
Die Gewinner der fünf Briefbeschwerer »Evolution Mensch« sind Friedrich Hein, Petershausen; Cordula Schickel, Erding; Hella Riede, Tübingen; Jürgen Meier, Braunschweig; und Elisabeth Arnold, Essenbach.

Der Kasten wird hinabgeschickt,
danach auch Christas Abfahrt glückt.
Wenn Christa bleibt im Eimer sitzen,
kann jetzt der Bernd nach unten flitzen.

Der Kasten saust erneut allein
nach unten. Bernd steigt mit hinein,
damit auch Alois, der Dicke,
sanft runterkommt zu seinem Glücke.
Nun kommt der Kasten wieder dran,
fällt solo ohne Frau und Mann.

Die Christa in den Eimer steigt,
der sich mit ihr nach unten neigt,
wieder aber wieder hochgezogen
durch Bernd, der etwas mehr gewogen.

Und wieder fällt der alte Kasten
allein herab mit Werkzeuglasten,
damit zum dritt- und letzten Male
die Christa nutzt die Eimerschale.
Zu dritt beglückwünscht man sich munter,
da knallt der Werkzeugkasten runter.



Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ präsentation der als Emotion beschriebenen Ereignisse. Während Damasio die Entstehung von Emotionen im Gehirn anschaulich und präzise darstellt, bleibt gänzlich unklar, wie und wo die korrespondierenden Gefühle entstehen.

Emotionen spielen eine Rolle bei Entscheidungsprozessen und bei der Bewertung sozialer Situationen im Alltag. Läsionen der Amygdala können zu Gefühlsarmut führen, eine Schädigung frontaler Hirnbereiche führt zu impulsivem, enthemmtem Verhalten. Die Betroffenen sind leicht ablenkbar, vernachlässigen moralische und soziale Prinzipien und neigen zu risikoreichem Verhalten. Hinzu kommt die Unfähigkeit, Handlungen zu planen und durchzuführen, wobei die intellektuellen Fähigkeiten der Betroffenen häufig unbeeinträchtigt sind.

Die Erkenntnis, dass Emotionen unser Sozialverhalten bestimmen und dass dieses bei Läsionen entsprechender Kortexareale eben gestört ist, ist jedoch nicht neu. Neu hingegen ist die Frage, welche Rolle Emotionen bei der Beantwortung persönlicher Lebensfragen spielen. Hier greift Damasio auf die Antwort Spinozas zurück, der eine Art Anforderungskatalog für ethisches und tugendhaftes Verhalten aufstellt. Im Zentrum der Ideen Spinozas steht jedoch die Forderung, eine Toleranz gegenüber den eigenen negativen Emotionen zu entwickeln, indem man zum Beispiel das auslösende Erlebnis in der Vorstellung wiederholt. Hier kommt die Neurowissenschaft ins Spiel, denn um emotionale Prozesse – zum Beispiel bei der Behandlung einer Depression – beeinflussen zu können, muss der Therapeut diese Prozesse kennen.

Auch wenn Damasios neuestes Buch die empirische Forschung nicht durchweg präzise zusammenfasst und eine eher eigenwillige Emotionstheorie bietet, ist es doch eine lebhafte und geistreiche Einführung in das Werk Spinozas. Es gelingt dem Autor, der Suche nach dem neuronalen Korrelat der Emotionen einen philosophischen Sinn zu verleihen. Nicht zuletzt bieten Damasio und Spinoza – der Neurologe und der Philosoph – eine Anleitung für ein zufriedeneres Leben, ermöglicht durch das Wissen um die Herkunft, Entstehung und Funktion von Emotionen. ◁

Miriam Spering

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und promoviert an der Universität Gießen über die Zielselektion bei Augenbewegungen.

Warum steigt der Wasserspiegel?

Man muss nicht den Druck bemühen, um Gleichgewichte in der Hydrostatik zu finden. Der Energiebegriff erweist sich als nützlicher.

Von Norbert Treitz

Druck ist Kraft geteilt durch Fläche, lernt man in der Schule. Das klingt einfach und macht plausibel, dass in der Mechanik der Flüssigkeiten der Druck als zentrale Größe gilt. In Wirklichkeit ist es nicht ganz so einfach. Es handelt sich um den (skalaren) Quotienten aus dem Vektor Kraft und dem Vektor, der die Fläche beschreibt (und auf ihr rechtwinklig steht); beide Vektoren müssen in dieselbe Richtung weisen. Um die eigentlich triviale Tatsache zu zeigen, dass dieser Skalar »nach allen Richtungen« gleich ist, werden sogar spezielle Geräte angeboten.

Nehmen wir stattdessen einen viel bequemeren Begriff, der seine Nützlichkeit schon »im Trockenen«, nämlich beim Studium von Waagen, bewiesen hat: die Energie (Physikalische Unterhaltungen, Oktober 2004). Dabei lassen wir den Beitrag der Kapillarität zur Energie außer Acht, füllen also unsere Flüssigkeit nicht in sehr enge Röhrchen. Verformungsenergien sollen ebenfalls keine Rolle spielen, denn Flüssigkeiten sind nahezu inkompressibel. (Eine Flüssigkeit nimmt zwar durch Druck kaum an Volumen ab; aber nur durch diese minimale Kompression setzt sich – über Stöße zwischen den Molekülen – auf Kolbendruck am einen Ende des Zylinders das Wasser am anderen Ende in Bewegung. Gleichwohl ist in der Energiebilanz die Verformungsenergie vernachlässigbar.)

Als Modell für ein Schiff auf einem See diene ein Stück Holz in einem wassergefüllten Becher. Wie wandert der gemeinsame Schwerpunkt von Schiff und Wasser, wenn das Schiff von einem Riesen – oder im Modell von Ihnen – tiefer eingetaucht oder angehoben wird? Die einzelnen Schwerpunkte gehen verschiedene Wege, aber ob sich das ausgleicht?

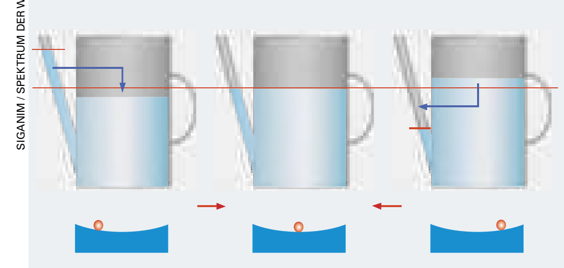
Die einzige Energie, auf die es hier ankommt, ist die potenzielle Energie im homogenen Schwerefeld; die ist proportional der Höhe des Schwerpunkts (über einer willkürlichen Nulllinie). Da zum stabilen Gleichgewicht ein lokales Minimum der potenziellen Energie gehört, muss die tiefste Lage des Schwerpunkts beim normal schwimmenden Schiff vorliegen, denn in diese Lage kehrt es nach dem Eingriff des Riesen so oder so zurück. Einerlei ob der das Schiff tiefer tunkt oder anhebt, der Schwerpunkt des Gesamtsystems erhöht sich.

Das wird noch deutlicher, wenn man ein U-Rohr betrachtet. Seine Schenkel dürfen verschieden weit und unregelmäßig geformt sein – nur nicht zu eng, damit die Kapillarität vernachlässigbar ist. Der Schwerpunkt der Flüssigkeit liegt genau dann am tiefsten, wenn die »Spiegel«, das heißt die Grenzflächen zur Atmosphäre, in beiden Schenkeln gleich hoch sind. Denn für jede Änderung aus diesem Zustand heraus müsste *per saldo* ein Teil der Flüssigkeit von einem tieferen zu einem höheren Niveau verlagert werden, was den Schwerpunkt anheben würde. Das klärt auch, warum das Wasser in beiden Teilen einer Gießkanne (oder sonst in »kommunizierenden Gefäßen«) gleich hoch steht (Bild rechts).

Wenn das Wasser im U-Rohr schwappt, wandert der Schwerpunkt der ganzen Flüssigkeit exakt auf einer nach oben offenen Parabel (2. Grades), wenn die Schenkel zylindrisch und senkrecht, aber nicht notwendigerweise gleich dick sind. Zum Minimum im Scheitel der Parabel gehört das Gleichgewicht mit beiden Oberflächen in einer gemeinsamen horizontalen Ebene.

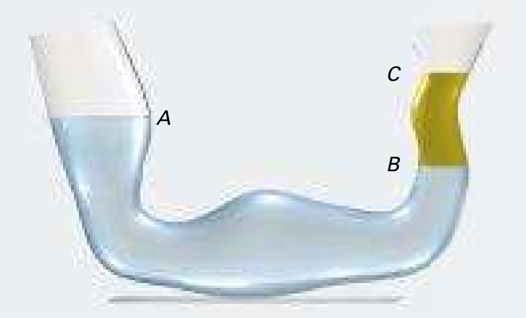
Dichtemessungen: Auf einer Seite des U-Rohrs werde eine leichtere Flüssigkeit hinzugegeben, die sich mit der anderen nicht mischt. Welche Gleichgewichtskonfiguration stellt sich ein? Hier hilft es, sich die Materie so vorzustellen wie Isaac Newton: Die kleinsten Teilchen sind alle gleich schwer (also müsste man heute am ehesten an Nukleonen denken), sie sind nur mit größeren oder kleineren Zwischenräumen gepackt. Wenn ein Glas mit Bier und Schaum darüber auf der Waage steht, kann der Schaum zerfallen. Dabei sortiert sich das Gemisch aus Gas und Bier (also der Schaum) vertikal, sodass nachher das Gas ganz über der Flüssigkeit ist. Die *quantitas materiae* (wir sagen heute Masse) hat sich nicht geändert, die Waage schlägt nicht aus, der Schaum ist sozusagen mit Luft verdünntes Bier; aber auch Eis ist – aufgespreizt durch die Brückenbindungen – mit etwas mehr Vakuum verdünntes Wasser.

Öl ist hinsichtlich des Schwerefelds so etwas wie (zum Beispiel) auf das 1,25-fache Volumen verdünntes Wasser. Wenn eine Ölschicht von 1 cm Höhe in einem Schenkel ist, sollte der andere Schenkel mit Wasser 8 mm über der unteren Grenze, also 2 mm unter der oberen des Öls gefüllt ein. Denn eine infinitesimal kleine Verlagerung des Öls um ein Volu-

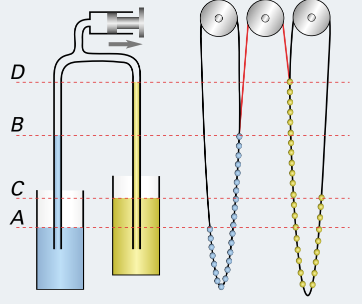


SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Stabiles Gleichgewicht und Ungleichgewichte der Gießkanne mit Analogie



Wenn sich die Flüssigkeiten um ein sehr kleines Volumen *dV* nach rechts verschieben, wandert ein Volumen *dV* der blauen Flüssigkeit abwärts von Höhe *A* nach *B* und ein gleiches Volumen der gelben aufwärts von *B* nach *C*. Verhalten sich die Dichten wie die Höhendifferenzen, besteht (stabiles) Gleichgewicht.



Dichtemessung nach Watt, Variante mit verkleinertem Luftvolumen: Das Verhältnis der Dichten von gelber und blauer Flüssigkeit ist (*B*–*A*):(*D*–*C*). In der Analogie mit Ketten anstelle der Flüssigkeiten (rechts) tritt an die Stelle der Dichte die Masse pro Längeneinheit.

SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

men *dV* nach oben entspricht dem Hochpumpen von *dV* Öl um 1 cm und gleichzeitig dem Absenken des gleichen Volumens Wasser um 8 mm (Bild oben, links). Die potenzielle Energie (und die Höhe des gemeinsamen Schwerpunkts) als Funktion der Pegeländerung haben hier also eine Horizontalstelle, und zwar ein Minimum, wie man beim Betrachten größerer Verschiebungen sieht.

So kann man mit dem U-Rohr (das ziemlich unregelmäßig geformt sein darf) Dichteverhältnisse sehr einfach bestimmen, wenn die Flüssigkeiten sich nicht mischen. Geht das auch, ohne dass man etwas von beiden aus ihren Flaschen ausgießt?

Nach James Watt nimmt man dafür ein umgekehrtes U-Rohr, in das man mit einer absperrbaren Verzweigung einen kleinen Überdruck pusten muss. Bei ungiftigen Flüssigkeiten oder entsprechenden Vorsichtsmaßnamen darf es auch ein Unterdruck sein, wobei die nutzbare Höhe des Rohrs dann kaum noch begrenzt ist. Etwas aufwändiger ist eine kleine Arztspritze zur Verlagerung des eingesperrten Luftvolumens. Dieses »Stück Luft« wirkt dabei wie ein verschiebbares, nahezu invariables Volumen fast ohne Masse.

Alternativ kann man die eingetauchten Röhrchen nach oben offen lassen, dafür aber die Lufträume über beiden Flüssigkeitsspiegeln in den Flaschen durch einen Schlauch miteinander verbinden und gegen die Außenluft abdichten. Das ist die Watt'sche Anordnung unter Vertauschung von Innen- und Außenbereich.

Wenn es Sie stört, dass wir nun doch den Druckbegriff im Spiel haben: Man könnte im Gedankenversuch irgendeine Flüssigkeit nehmen, die fast masselos ist und etwas mehr – oder etwas weniger – Volumen hat, als im Schlauch sonst zwischen den Spiegeln frei wäre. Im stabilen Gleichgewicht steht nun an beiden Enden des U-Rohrs die jeweilige Flüssigkeit innen tiefer – im zweiten Fall höher – als außen. Das Verhältnis dieser Differenzen ist der Kehrwert des Dichteverhältnisses (Bild oben, rechts).

Wenn unsere eingesperrte Luft – die wir als inkompressibel ansehen dürfen, obwohl niemand das allgemein als Eigenschaft der Luft bezeichnen würde – um ein infinitesimales Volumen *dV* verschoben würde, dann würde an beiden Enden die Flüssigkeitsmenge *dV* um die jeweils dazugehörige Höhendifferenz nach oben beziehungsweise unten verlagert. Wenn das zusammen energetisch neutral sein soll (Horizontalstelle der potenziellen Energie), müssen sich die Höhendifferenzen umgekehrt wie die Dichten verhalten.

Kaum zu glauben: Die beiden Schenkel des Röhrchens müssen nicht gleich weit sein, nicht einmal zylindrisch, es kommt nur auf das Verhältnis der beiden Höhendifferenzen an, denn zum Volumen *dV* gehören verschwindend kleine Höhen, und was in die »Rechnung« eingeht, sind nicht diese Höhen, sondern die gedachten Höhenwanderungen, also die Höhenunterschiede zwischen den Stellen, wo das Volumen weggenommen und wo es zugefügt wird.

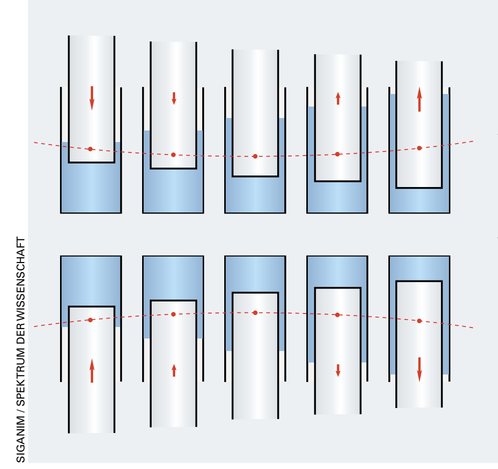
Das Bild rechts daneben zeigt eine Analogie mit Ketten und masselosen, undehnbaren Fäden an reibungslosen Rollen. Für sich genommen ist jede Kette im Gleichgewicht, wenn beide Enden ihres massebehafteten Teils gleich hoch hängen. Der rote Faden erzwingt, dass die beiden inneren Enden höher liegen, lässt aber wegen der mittleren Rolle frei, wie sich diese Anhebung auf beide Ketten verteilt. Dieses Verhältnis wird durch das Verhältnis der längenbezogenen Massen der Ketten bestimmt.

Eine infinitesimale Änderung würde alle vier Niveaus *A*, *B*, *C* und *D* um die gleiche kleine Differenz *dh* nach oben beziehungsweise unten ändern. Das entspricht per saldo einer Wanderung eines Kettenstückes der Länge *dh* von *A* nach *B* und eines gleich langen – eher gleich kurzen – Stückes der anderen Kette von *D* nach *C*. Im Gleichgewicht ist das energetisch neutral, wenn sich *B*–*A* und *D*–*C* umgekehrt wie die längenbezogenen Massen verhalten.

Wer glaubt, man müsse die Hydrostatik unbedingt überall mit Drücken diskutieren, müsste sich hier um die Abhängigkeit der Fadenspannung von der Höhe Gedanken machen. Einfacher geht es in beiden Fällen mit der Energie, die obendrein im Gegensatz zum Druck keine spezielle Größe für die Hydrostatik ist, sondern bei allen Gleichgewichten in der ganzen Physik die gleiche Rolle spielt.

Trotzdem ist die Analogie nicht ohne Tücken. Bei den Ketten spielen die Gewichte entscheidende Rollen, bei den Flüssigkeiten aber die Dichten. Man pflegt von Flüssigkeitssäulen (statt Flüssigkeitsschichten) zu sprechen und erklärt damit stillschweigend den Fall gleicher Querschnitte zum Normalfall. Und schon ist man genötigt, über das »hydrostatische Paradoxon« zu staunen, das nichts weiter besagt, als dass es – auch für den Druck – nicht wirklich auf das Gewicht von Säulen ankommt, sondern auf das Integral der Dichte nach der vertikalen Koordinate, völlig unabhängig vom waagerechten Querschnitt. Was aber in allen Fällen entscheidet, ist die Energieänderung bei einer infinitesimalen (»virtuellen«) Verlagerung von gleich kleinen infinitesimalen Volumen-(Längen-)Stückchen um große – und messbare – Höhendifferenzen.

Wieso spritzt in Herons Brunnen das Wasser höher als über jede Füllhöhe in dem System? Man kann sagen: Mit Überdruck, der mit dem leichten Medium Luft auch nahezu unvermindert zwischen verschiedenen Höhen »übertragen« werden kann, wird Wasser aus dem oberen Topf gespritzt (Bild rechts oben). Man kann aber auch sagen: Wenn man das Ausgussrohr einer vollen Gießkanne ▷



◀ Schiff (inneres Röhrchen) im See in verschiedenen Startpositionen vor dem Umdrehen (oben) und danach. Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der gemeinsame Schwerpunkt jeweils wandern wird.

▶ Herons Brunnen; das eingesperrte nahezu konstante Luftvolumen ist grau gezeichnet.



▷ weit unten abschneidet, spritzt das Wasser nach oben heraus. Auf Herons Brunnen angewandt: In einem längeren Röhrchen an der Stelle des Spritzröhrchens (das im Bild rechts oben nur zur Erläuterung eingezeichnet ist) muss im Gleichgewicht der Niveauunterschied zwischen den »linken« Wasserspiegeln so groß sein wie zwischen den »rechten«. Da das rechte Röhrchen aber in Wirklichkeit zu kurz ist, spritzt dort das Wasser heraus.

Man ersetze in Gedanken die Ölschicht aus der ersten Anordnung zur Dichtemessung (diesmal mit zylindrischen Röhrchen) durch ein festes Objekt gleicher Dichte, zum Beispiel einen reibungsfreien Stöpsel definierter Masse, der fast den ganzen Querschnitt ausfüllt. Am stabilen Gleichgewicht ändert sich dadurch nichts. Dann kann man aber auch gleich auf die zwei Schenkel des U-Rohrs verzichten und den Stöpsel einfach wie ein Schiff schwimmen lassen – kentern darf er natürlich nicht.

Vom U-Rohr zum umgekehrten Schiff: Als Nächstes wählen wir als Schiff und als See zwei zylindrische Röhrchen (zum Beispiel aus einer Glas-Spardose für Münzen) mit etwas verschiedenen Durchmessern. Dass die Kapillarität die Sache ungenau macht, ändert nichts am stabilen Gleichgewicht: Tunken wir das innere Röhrchen tiefer und lassen los, kommt es zurück, aber auch, wenn wir es etwas anheben und dann loslassen.

Gibt es auch labile Gleichgewichte? Dazu halten wir beiden Röhrchen im leicht eingetunkten Zustand fest, drehen sie schnell auf den Kopf und lassen sofort das innere Röhrchen los. Anschließend läuft zwar das Wasser aus, aber wir können noch beobachten, wie das innere Röhrchen (»Schiff«) aufsteigt. Wenn wir denselben Versuch mit dem etwas angehobenen statt eingetunkten Schiff machen, fällt es sogleich heraus, was erheblich weniger überraschend ist. Des Rätsels Lösung: Durch die Umkehrung des Schwerefelds relativ zum System ist aus dem lokalen Minimum der Energie ein Maximum geworden, aus dem stabilen also ein labiles Gleichgewicht.

Quizfragen

▶ *Der Schlüssel im Boot auf dem See:* Aus einem schwimmenden Boot wird ein Schlüssel ins Wasser geworfen. Steigt oder sinkt der Wasserstand dieses Sees dadurch? Bitte erst raten, dann Modellversuch mit Gefäßen aus Küche oder Hausbar machen, dann weiterlesen! Unter Wasser verdrängt der Schlüssel sein eigenes Volumen, im Boot aber entspricht sein Gewicht dem Zufügen von einer gleich schweren Menge Wasser. Wenn Sie gesagt haben »Viel kann es jedenfalls nicht sein«, so haben Sie natürlich Recht, aber man kann ja für konkrete Seen und Schlüssel die Anzahl der Atomlagen abschätzen. Sollte der Schlüssel eine kleinere Dichte als das Wasser haben, so muss man unterscheiden, ob er nach dem Hinauswerfen schwimmen kann (für den Wasserstand neutral!) oder ob er von einem Taucher unter Wasser festgemacht wird.

▶ *Schräg stehende Flasche:* Wenn man eine teilweise gefüllte Flasche etwas schräg stellt, wird der Schwerpunkt dabei angehoben. Wird er mehr gehoben, wenn der Inhalt flüssig oder wenn er eingefroren ist, die Oberfläche also waagerecht bleibt oder gedreht wird (die Dichte sei nicht verschieden)? Die Antwort ist sehr einfach: Wenn der gefrorene Inhalt bei der schräg gestellten Flasche schmilzt und die Oberfläche sich waagerecht einstellt, kann der Schwerpunkt dabei jedenfalls nicht steigen, und wenn er gleich hoch bliebe, gäbe es auch keinen Grund zur Veränderung der Gestalt.

▶ *Der Schwerpunkt im Trinkgefäß:* Martin Gardner, der legendäre Autor der »Mathematischen Spielereien«, fragte im April 1972 in unserer Mutterzeitschrift Scientific American, an welcher Stelle der gemeinsame Schwerpunkt von Gefäß und Inhalt durch seine minimale Höhe wandert, wenn man eine zunächst leere Bierdose allmählich voll gießt. Im darauf folgenden Heft beschrieb er ein Gedankenexperiment mit eingefrorenem Bier in einer seitwärts auf einem Messer balancierten Dose und gelangte damit zu einem bemerkenswerten Zwischenergebnis: Der Schwerpunkt wandert genau dann durch seinen tiefsten Punkt, wenn er im Flüssigkeitsspiegel liegt.

Die Erklärung ist eigentlich auch ohne das Gedankenexperiment umwerfend einfach: Solange man Flüssigkeit zugibt, die unter dem augenblicklichen Schwerpunkt »landet«, steigt dieser ab, im umgekehrten Fall auf. Dabei muss keine Voraussetzung über Form oder Gewichtsverteilung des Gefäßes gemacht werden, außer dass der Schwerpunkt des leeren Gefäßes überhaupt für die Flüssigkeit erreichbar ist. Man kann sich also für den äußerst eleganten Beweis der Koinzidenzaussage völlig von der umweltfeindlichen Dose frei machen. ◁



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hochbegabter Kinder und Jugendlicher.

Nüsse & Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch. Harri Deutsch, Frankfurt (Main), in Vorbereitung

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Spiele mit Physik! Von Norbert Treitz. 4. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1996

Beglücke die Welt, aber übernimm dich nicht

Der »humane Utilitarismus« verwendet Konzepte aus der theoretischen Physik und Verfahren aus der numerischen Optimierung – ungewöhnlich für eine Philosophie, aber mit einem gewissen Erfolg.



Von Christoph Pöppe


Zwischendurch dachte ich, ich sei im falschen Buch. Der Text klingt so typisch nach einem Physiker, und zwar einem von der ganz theoretischen Sorte: Der fragt nicht in erster Linie nach der Lösung einer quantitativ formulierten Aufgabe, sondern eher danach, was die Welt im Innersten zusammenhält. Ein solcher Mensch ist am glücklichsten, wenn er die ganze Welt mit einer einzigen Funktion beschreiben kann; die heißt zum Beispiel »Wirkungsintegral« oder »Entropie«. Die Natur verhält sich so, dass diese Funktion ein Maximum annimmt (oder auch ein Minimum, was eine eher belanglose Frage des Vorzeichens ist). An diesem einen Prinzip hängt die ganze Physik. Kräfte, Drücke und was sonst in der Alltagsphysik die entscheidende Rolle spielt, sind von dieser höheren Warte aus nichts weiter als abgeleitete Größen.

Ich bin aber in einem Buch eines Philosophen, und zwar eines von der durchaus praktischen Sorte. Der Düsseldorfer Philosophiedozent Bernward Gesang stellt nicht die Frage »Was können wir erkennen?«, sondern »Was sollen wir tun?«. Und er gibt darauf die Antwort des Utilitarismus: Es gibt eine einzige Funktion, auf die es ankommt; die heißt zum Beispiel »Glück der ganzen Menschheit«. Der Mensch soll sich so verhalten, dass diese Funktion maximiert wird. An diesem einen Prinzip hängt die ganze Ethik. Prinzipien wie die Gerechtigkeit und unveräußerliche Menschenrechte sind von dieser höheren Warte aus nichts weiter als abgeleitete Größen.

Auf den ersten Blick ist eine solche *theory of everything* ungeheuer attraktiv, in der Physik wie in der Philosophie. Sie erfasst die ganze Welt auf elegante Weise unter einem einheitlichen Blickwinkel; sie reduziert die Anzahl der Axiome, das heißt der Aussagen, die man schlucken muss, ohne sie hinterfragen zu können, auf das absolute Minimum, und alles sieht sehr einfach, klar und übersichtlich aus.

Lässt sich Glück quantifizieren?

Einen entscheidenden Unterschied gibt es zwischen Physik und Philosophie: Die Natur maximiert ihre Zielfunktion von alleine, und wir können ihr allenfalls dabei zuschauen. Für die Maximierung des menschlichen Glücks müssen wir selbst etwas tun. Damit wird die Ethik zu einer Optimierungsaufgabe; und schon tritt der Mathematiker auf den Plan, und zwar einer von der sehr angewandten Sorte: Er sieht seine Aufgabe nicht in erster Linie in der Produktion ewiger Wahrheiten, sondern in der Lösung quantitativ formulierter Probleme.

In der Tat stellt der Utilitarist sich die Zielfunktion, sprich das Glück der Menschheit, quantitativ bestimmbar vor – zumindest im Prinzip. Zu jedem denkbaren Zustand der Welt, beschrieben durch ungeheuer viele Variable, lässt sich die globale Glücksfunktion berechnen. Also sollen die Menschen die Variablen so verändern, dass diese Funktion maximal wird.

Wie berechnet man das Glück der Menschheit? Der erste Schritt ist einfach: Man nehme das individuelle Glück jedes Menschen und addiere über alle Menschen. Darin steckt der Gleichheitsgrundsatz: »Jeder zählt als einer, keiner mehr als einer«, so der Slogan des frühen Utilitaristen Jeremy Bentham (1748–1832). Gegen diesen Ansatz ist schwerlich et-

was einzuwenden; problematisch ist allenfalls die Frage, wer als Mensch zählt. Damit das Glück eines Menschen definierbar ist, muss dieser im Prinzip glücksfähig sein. Das erfordert eine Fähigkeit zu gewissen Bewusstseinszuständen, die sowohl dem Neugeborenen als auch dem Komapatienten abgeht, mit möglicherweise brutalen Konsequenzen für beide.

Schwieriger ist die Frage, wie das individuelle Glück des Menschen zu bestimmen sei. Eigentlich ist es ein Seelenzustand; da der aber kaum vom Subjekt selbst, geschweige denn von außen quantifizierbar ist, muss man sich auf Hilfskonstruktionen stützen.

Eine erste Näherung geben die Wirtschaftstheoretiker mit ihren Nutzenfunktionen: Jeder Mensch weist dem Besitz gewisser Güter einen gewissen Wert (»Nutzen«, *utility*) zu. Der gegenwärtige Glückszustand des Menschen ist die Summe aus den Gütern, die er hat, jedes Gut multipliziert mit dessen *utility*. Warum kauft sich der Mensch einen Hamburger? Weil er – wegen Hungers – die *utility* des Hamburgers höher einschätzt als die von 2,50 Euro in seiner Tasche, also durch den Tausch seine persönliche Nutzenfunktion erhöht.

Indem man diese Definition von materiellen auf immaterielle Güter aller Art erweitert, kommt man der utilitaristischen Glücksdefinition schon sehr nahe. Man wünscht sich verschiedene Dinge mit verschiedener Intensität, und Glück ist die Summe dieser Intensitäten über alle erfüllten Wünsche.

Wie misst man diese alles entscheidenden Intensitäten? Indem man den Menschen fragt, was er will, und wenn man ihm misstraut, indem man objektive Merkmale heranzieht, zum Beispiel ob sein Speichelfluss sich erhöht, er andere Anzeichen freudiger Erwartung erkennen lässt oder bereit ist, Geld auszugeben, wenn ihm die Erfüllung eines Wunsches in Aussicht gestellt wird.

Wünsche sind zeitlich veränderlich; auf welchen Zeitpunkt kommt es an? Eigentlich müsste man über die ganze Lebenszeit des Menschen integrieren. Aber in aller Regel fehlt mir zu dem Zeitpunkt, an dem ich eine Entscheidung zu treffen habe, zureichende Information über die Zukunft – sowohl der Welt als auch meiner Wünsche. Da muss ich statt meines Glücks dessen – geeignet geschätzten – Erwartungswert maximieren. Das ist vielleicht sehr schwierig und fehlerträchtig, stellt aber die grundsätzliche Brauchbarkeit der Definition nicht in Frage.

Es kommt auch nicht darauf an, ob ich meine Glücksfunktion auf sechs Stellen hinter dem Komma ausrechnen kann – das kann ich eigentlich nie; es genügt in einer Entscheidungssituation zu wissen, welche von mehreren Alternativen den höheren Glückswert ergibt. In



diesem eingeschränkten Sinn sind Äpfel und Birnen, oder auch ein Döner und ein romantischer Abend bei Kerzenschein, ohne Weiteres miteinander vergleichbar. Ich muss mir nur überlegen, was von beiden mir besser schmeckt beziehungsweise mehr Geld wert ist.

Mit einer so unscharf definierten Zielfunktion könnte ein numerisches Optimierungsprogramm zwar noch nichts anfangen, ein numerischer Mathematiker aber schon. Denn auch ohne doppeltgenaue Arithmetik ist aus allgemeinen Eigenschaften der Glücksfunktion erschließbar, in welche Richtung die Veränderung der Welt zur Mehrung ihres Glücks stattzufinden hat.

Ein Beispiel: Die ökonomischen Nutzenfunktionen sind in aller Regel konkav. Die zweite Million beglückt mich nicht mehr so wie die erste, also wird meine Glücksminderung durch den Verlust der zweiten Million bei weitem übertroffen durch den Glückszuwachs bei den Armen, denen sie gegeben würde. Und schon läuft der Utilitarismus auf eine totale Gleichverteilung aller Güter hinaus, eine Konsequenz, von der er sich durch Anwendung etlicher Kunstgriffe erst wieder befreien muss (siehe unten).

Wie viel Euro ist ein Menschenleben wert?

Aber der Utilitarismus macht vor dem Recht auf Eigentum nicht Halt. Moralische Prinzipien sind eben abgeleitete Größen: Gerechtigkeit ist nicht ein Wert an sich, sondern ein Gut, das die Menschen sich sehr intensiv wünschen, wie jeder weiß, der Kinder hat und beobachten kann, wie heftig sie auf Ungerechtigkeiten reagieren.

Das Recht auf Leben ist kein originäres Grundrecht, sondern folgt schlicht daraus, dass seine Verletzung die Glücksfunktion des Betroffenen gewaltig mindern würde – bis auf null in diesem Fall. Aber prinzipiell ist ein Glücksgewinn denkbar, der diesen Glücksverlust aufwie- ▷

▷ gen könnte. So dürfte man auch einen unschuldigen Menschen umbringen, um das Leben mehrerer Menschen zu retten. Und einen Schuldigen sowieso: Die Befriedigung des Publikums über die gerechte Strafe, die den Mörder ereilt, wiegt dessen Glücksverlust durch die Hinrichtung auf – nach der Auffassung des Gouverneurs von Texas.

Für den Utilitaristen gibt es also durchaus Menschenrechte, aber nur wenn und insoweit die Menschen ihre Einhaltung wünschen, und das mit zureichender Intensität. Denn Glück wird an der Intensität der Wünsche gemessen, und jede Weltverbesserung läuft darauf hinaus, intensive Wünsche eines Menschen zu Lasten weniger intensiver Wünsche eines (möglicherweise anderen) Menschen zu erfüllen.

Weltverbesserung unter Einhaltung der Menschenrechte heißt bei den Mathematikern »Optimieren mit Nebenbedingungen«. Bei der profanen Tourenplanung für Lastwagen sind das Bedingungen, die eingehalten werden müssen, weil es nicht anders geht (mehr als ein gewisses Maximalvolumen passt einfach nicht auf den Laster) oder weil es vorgeschrieben ist (die Lenkzeiten für die Fahrer dürfen nicht überschritten werden). Weil das Nebeneinander von Zielfunktion und Nebenbedingungen das Problem unüberschaubar macht, verwendet man einen Kunstgriff: Man erklärt die Nichteinhaltung von Bedingungen nicht für unmöglich, sondern nur für sehr teuer, so als müsste man für den Verstoß gegen die Vorschriften Strafe zahlen. Man spricht von »Straffunktionen« *(penalty functions)*. Dann hat man nur noch eine Zielfunktion, nämlich die Kosten, die in diesem Fall zu minimieren sind.

»Du sollst deinen Nächsten lieben wie dich selbst.« Daran hängt das ganze Gesetz und die Propheten. ***Matthäus 27, 39 – 40***

Der Kunstgriff funktioniert. Es stellt sich heraus, dass der Unterschied zwischen sehr teuer und unendlich teuer, sprich unmöglich, zwar theoretisch immens, in der Praxis aber ziemlich belanglos ist. Allerdings hängt das Funktionieren des Verfahrens entscheidend davon ab, wie hoch man das Strafmaß ansetzt und im Verlauf der Optimierung steigert.

Aus pragmatischen Gründen ersetzen also die numerischen Optimierer das echte Problem (mit den Nebenbedingungen) durch eines mit nur einer Zielfunktion, bei dem so ziemlich dieselbe Lösung herauskommt. Das tun die Utilitaristen irgendwie auch. Aber tun sie es aus pragmatischen oder aus prinzipiellen Gründen? Das ist bei ihnen so ziemlich dasselbe, denn es kommt ihnen nur auf das Endergebnis an (»Konsequentialismus«). Immerhin ersparen sie sich die Mühe, die Menschenrechte eigens zu begründen, allerdings um einen hohen Preis. Was dem Optimierer die Straffunktion, das ist dem Utilitaristen die Intensität der menschlichen Wünsche. Und die ist höchst variabel, wie jeder weiß, der Kinder hat und auf einem Spaziergang am Eisstand vorbeikommt.

Was geht mich das Verhalten meines Mitmenschen an?

Damit das Richtige herauskommt, muss der Utilitarist über diese Intensitäten die wildesten Annahmen treffen. Es gibt Menschen, denen ist das, was andere Menschen tun, so unerträglich, dass sie dagegen sehr intensive Wünsche vorbringen, obgleich sie nicht direkt betroffen sind: gleichgeschlechtliche Liebe, unverschleiertes Auftreten in der Öffentlichkeit, Tierversuche, Abtreibung gesunder Embryonen, … Der klassische Utilitarist lässt, in guter liberaler Tradition, diese Wünsche, die sich nicht auf die eigene Person beziehen (»externe Präferenzen«), schlicht nicht gelten: Dass dein Nachbar schwul ist, kann dein Glück nicht mindern.

Dann allerdings hat er auch gegen die Tötung behinderter Neugeborener und hoffnungslos dementer Menschen nichts einzuwenden, denn die zählen mangels Glücksfähigkeit in der Bilanz nicht mit. Mit diesem Argument hat insbesondere der australische Utilitarist Peter Singer vor einigen Jahren große Empörung ausgelöst.

Bernward Gesang vertritt dagegen eine gemilderte Form des Utilitarismus: Genau diese Empörung sei in die Glücksbilanz mit einzubeziehen. Wenn die Tötung Neugeborener so viele andere Menschen unglücklich mache, dann sei es der globalen Glückssumme offensichtlich förderlich, sie zu verbieten. »Externe Präferenzen« seien ebenso zu berücksichtigen wie die gewöhnlichen egoistischen Wünsche.

Damit allerdings macht er ein Fass auf, dessen Inhalt er hinterher mühsam in Grenzen halten muss. Wünsche, die so schwach sind, dass ihre Erfüllung einen kaum merklichen Glücksgewinn verursacht – was habe ich davon, wenn mein Nachbar nicht schwul ist? –, sollen ignoriert werden, selbst wenn Milliarden von Menschen sie hegen. Denn Milliarden mal ein sehr kleiner Wunsch würde einen merklichen Posten in der Bilanz ausmachen, mit der Folge, dass es dem Schwulen an den Kragen gehen könnte.

Tierversuchsgegner bringen ihre Wünsche zuweilen sehr intensiv vor, bis hin zu Morddrohungen; ist das ein Grund, sie mehr zu be-

rücksichtigen als diffuse Abneigungen gegen Minderheiten? Übrigens hegt auch Osama bin Laden überaus intensive Wünsche und tut sehr viel für ihre Realisierung.

Gegen den klassischen Utilitarismus gibt es noch einen wesentlichen Einwand; und abermals versucht Bernward Gesang ihn mit einem Kunstgriff aus der numerischen Optimierung abzuwehren.

Es handelt sich um das Problem der Überforderung. Das Gebot, das Glück der Menschheit zu mehren, gilt für jeden Menschen und zunächst unter allen Umständen. Das heißt auch: Ich darf meinem Kind keine Markenjeans kaufen, sondern muss das viele Geld dafür – zum Beispiel – einem hungernden Kind in Somalia geben, denn dessen Glück würde davon ohne Zweifel weitaus mehr erhöht als mein eigenes. Oder verallgemeinert: Nimm alles, was du hast – und je erwerben wirst –, und gib's den Armen. (Den halben Mantel darfst du behalten; denn Frieren ist sehr schlecht für die Glücksfunktion.)

In einer Welt, in der die Unterschiede im persönlichen Glück gering sind, wäre das eine hervorragende Regel, die jedermann gerne befolgen wird, schon weil sie nicht viel von ihm fordert. Sie ist geeignet, aus einem fast paradiesischen Zustand den absolut paradiesischen zu machen. In der realen, offensichtlich sehr unparadiesischen Welt ist sie untauglich, denn niemand ist bereit, ihr zu folgen, außer einer verschwindenden Minderheit von Heiligen.

Muss ich ein Heiliger sein?

Das ist wie das Newton-Verfahren zur Bestimmung einer Nullstelle einer Funktion (und das Optimum unserer Zielfunktion lässt sich in eine Nullstelle einer anderen Funktion umrechnen): Man findet die Nullstelle sehr schnell und mit großer Genauigkeit – vorausgesetzt, man ist schon einigermaßen in ihrer Nähe. Das Newton-Verfahren ist das Mittel der Wahl, um einen fast paradiesischen Zustand ganz paradiesisch zu machen. Aus irgendeinem Zustand heraus springt es dagegen häufig in einen noch viel schlechteren Zustand, und das, obgleich die Richtung ungefähr stimmt.

Die Lösung des Dilemmas ist das gedämpfte Newton-Verfahren: Man tut nur, sagen wir, 10 Prozent von dem, was das Newton-Verfahren ansagt. In dem so veränderten Weltzustand fragt man das Verfahren abermals, was es tun würde, erhält im Allgemeinen eine deutlich andere Antwort als zuvor, folgt ihr wieder nur zu 10 Prozent, und so weiter.

So macht der »humane Utilitarismus« das auch – und kann dieses Verfahren aus den eigenen Prinzipien begründen. Erstens: Eine Ethik, die den Menschen ein permanent schlechtes Gewissen bereitet, weil sie die geforderte Heiligen-Grundhaltung nicht aufbringen, macht sie unglücklich und verfehlt schon deswegen ihr erklärtes Ziel. Zweitens: Die utilitaristische Ethik misst alles am Endergebnis, auch sich selbst (»Ethikfolgenethik«). Wenn sie so gebaut ist, dass sie nicht befolgt wird, ist sie schon deswegen schlecht.

Also wird die Ethik umgebaut: Folge nur zu, sagen wir, 10 Prozent den Vorgaben der ungedämpften Ethik und zu 90 Prozent dem, was in deiner Gesellschaft üblich ist; das wird die Trägheit deines Herzens hoffentlich nicht überfordern. (Sonst nimm etwas weniger als 10 Prozent.) Beglücke die Menschheit, aber übernimm dich nicht! Eine Generation später wird sich hoffentlich die übliche Ethik zum Besseren verändert haben, und so weiter.

Unveräußerliche Menschenrechte – warum nicht?

Einerseits ist eine solche Ethik sehr attraktiv. Sie ist nicht abgehoben, sondern realistisch. Sie sagt den Menschen nicht abstrakt, was sie tun sollen, sondern nimmt Rücksicht auf ihre aktuelle Befindlichkeit. Sie gibt die Forderung an jeden Einzelnen, ein besserer Mensch zu werden, nicht auf, sondern dosiert sie so, dass sie erträglich bleibt. Damit ist der humane Utilitarismus – fordernd, aber nicht überfordernd – wie ein guter Pädagoge oder, besser noch, wie ein schlitzohriger Missionar: Ich weiß ja, dass Jesus Christus der einzige Weg zur Seligkeit ist, aber wenn ich das meinen Negerlein erzähle, laufen sie mir davon. Also lasse ich ihnen ihre traditionellen Götter – vorläufig.

Andererseits wird dadurch der humane Utilitarismus prinzipienlos bis zur Beliebigkeit. Denn sein einziges Prinzip, die Orientierung am Glück der Menschheit, hat er durch die ausufernde Definition von Glück bis zur Unkenntlichkeit verwässert. Das ist nicht gerade das, was man von einer Philosophie erwartet.

Eine gute Ethik soll ihren Kunden da abholen, wo er ist, und das ist von Kunde zu Kunde verschieden. Vielleicht ist ja der Utilitarismus eine gesunde Mischung zwischen Pragmatismus und echter Philosophie. Wenn die Utilitaristen ihre Methoden dafür von den angewandten Mathematikern übernehmen, spricht das nicht unbedingt gegen sie.

Ein Utilitarist könnte übrigens unveräußerliche Menschenrechte in seine Philosophie aufnehmen, ohne sich selbst untreu zu werden. Im Endergebnis käme seine Ethik zu denselben Schlüssen wie die Variante, die Menschenrechte nur als – besonders heftige – Wünsche gelten lässt; siehe die Verfahren zur Optimierung mit Nebenbedingungen. Und schließlich kommt es ja nur auf das Endergebnis an. ◁

AUTOR

Christoph Pöppe hat als Mathematiker Optimierungsprobleme bearbeitet und ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Eine Verteidigung des Utilitarismus. Von Bernward Gesang. Reclam, Stuttgart 2003

Leben Viren?

In der Grauzone zwischen belebt und unbelebt angesiedelt, wurde ihre Rolle bei der Evolution des Lebens lange verkannt. Gäbe es einen Preis für genetische Innovation, wären Viren Weltmeister

BRYAN CHRISTIE DESIGN

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Diamagnetische Levitation

Eine einfache Methode, mit der man Objekte magnetisch schweben lassen kann, erreicht nun Anwendungsreife



MIT FRDL. GEN. VON ANDRE GEIM, UNIVERSITY OF MANCHESTER



YUN SUK-BONG / EPA

Rinderwahnsinn – noch keine Entwarnung

Der Entdecker der Prionen, Nobelpreisträger Stanley B. Prusiner, diskutiert die Bemühungen um schnellere, frühzeitige BSE-Tests sowie um Therapien gegen Prionen-Krankheiten

Die neolithische Revolution

Wohin verschwanden die Jäger und Sammler Europas, als Bauern in der Jungsteinzeit das Regiment übernahmen?



KAREN CARR

Dinosaurier in Alaska

Bis vor 70 Millionen Jahren lebten die Monster im nördlichen Alaska – speziell adaptiert an Kälte und monatelange Dunkelheit